UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Aline Selau Santos

SEGMENTOS MONITORADOS DE ARARANGUÁ: CONSTRUÇÃO E PREVISÃO DE DESEMPENHO DO REVESTIMENTO EM CAMADAS SINGULARES E INTEGRADAS

Florianópolis
2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Aline Selau Santos

SEGMENTOS MONITORADOS DE ARARANGUÁ: CONSTRUÇÃO E PREVISÃO DE DESEMPENHO DO REVESTIMENTO EM CAMADAS SINGULARES E INTEGRADAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos, Aline Selau
SEGMENTOS MONITORADOS DE ARARANGUÁ: CONSTRUÇÃO E PREVISÃO DE DESEMPENHO DO REVESTIMENTO EM CAMADAS SINGULARES E INTEGRADAS / Aline Selau Santos ; orientador, Glicério Trichês - Florianópolis, SC, 2016.
219 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Pavimentação. 3. Desempenho. 4. Segmentos monitorados. 5. Asfalto-borracha. I. Trichês, Glicério. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Aline Selau Santos

SEGMENTOS MONITORADOS DE ARARANGUÁ: CONSTRUÇÃO E PREVISÃO DE DESEMPENHO DO REVESTIMENTO EM CAMADAS SINGULARES E INTEGRADAS

Essa dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 18 de agosto de 2016.

_____
Prof. Dr. Glicério Trichês – ECV/UFSC
Coordenador do Curso

_____
Prof. Dr. Glicério Trichês – ECV/UFSC
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

_____
Prof[a]. Dr[a]. Liseane P. Thives – ECV/UFSC
Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

_____
Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti - UFRGS
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

_____
Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi – ECV/UFSC
Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho a meu esposo Antônio e aos meus filhos Victor, Vinicius e Theo.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela infinita bondade e amparo nos dias difíceis.

Ao meu orientador, professor Glicério Trichês, pelo acolhimento, generosidade, ensinamentos, dedicação, confiança e sobretudo pela motivação.

Ao DNIT UL - Tubarão, na pessoa do Eng. Avani Aguiar de Sá, pelo apoio à realização do trabalho.

Ao Eng. João Roberto Schmitt, supervisor do Consórcio BR-101, pelo incentivo e por disponibilizar a equipe de laboratório para a coleta de amostras, realização de ensaios e levantamentos.

A todos os colegas de trabalho do Consórcio BR-101, em especial ao laboratorista Célio de Morais Lodetti, por sua valiosa contribuição e comprometimento.

Ao consórcio construtor Construcap/Mac/Ferreira Guedes, na pessoa do Eng. Vinicius Braga, pela disposição em ajudar, pela contribuição na coleta dos materiais e retirada de placas dos segmentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC pela oportunidade.

Aos professores da Pós-Graduação pelos ensinamentos e por servirem de inspiração, em especial aquele por quem guardo enorme admiração por tamanha bondade e por sua amizade, professor Antônio Fortunato Marcon.

À todos os excelentes profissionais do curso de Pós-Graduação, em especial à secretária Marinea Vieira, pelo suporte concedido.

Aos meus pais Reni e Lourdes por sempre fazerem o melhor por nós e às minhas irmãs Lilian e Cris, pelo imenso amor que nos une.

E por fim, ao meu esposo Antônio, que soube conviver com minha ausência, que sempre me incentivou a ir em busca dos meus sonhos e que sempre fez o possível para que eu conseguisse.

Muito Obrigada!

RESUMO

A prática tem mostrado que rodovias com alto volume de tráfego têm apresentado uma prematura perda de desempenho relacionado às condições estruturais e funcionais. Esse fato tem alertado para a necessidade de mudanças na concepção de projetos, seleção correta de materiais e atendimento das técnicas executivas e de manutenção. Nesse contexto, a Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, patrocinada pela Petrobras, em conjunto com diversas universidades brasileiras, implementou uma pesquisa sobre a construção e monitoramento de segmentos rodoviários em várias regiões do país com o objetivo de formar um banco de dados sobre a caracterização e comportamento de materiais, processos executivos e desempenho de estruturas de pavimentos. A partir desse banco de dados será desenvolvido um novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, calibrado para a realidade brasileira. Em Santa Catarina, assim como em outros estados foram selecionados trechos de rodovias para serem acompanhados durante a execução e monitorados quanto ao desempenho estrutural e funcional. Nesse trabalho, apresenta-se as informações relativas aos 5 segmentos inseridos na obra de duplicação da BR-101/SC. Os segmentos foram acompanhados desde a etapa de caracterização dos materiais em laboratório, controle tecnológico da fase executiva, desempenho da mistura asfáltica através de ensaios como fadiga e deformação permanente e avaliação das condições estruturais e funcionais através de levantamento de deflexões, irregularidade, afundamento de trilha de roda e atrito. Foi possível também realizar a estimativa de vida útil para os pavimentos com base nos módulos obtidos por retroanálise. Em um dos segmentos, parte da camada de revestimento foi executada em asfalto-borracha, possibilitando que se avalie também o desempenho do segmento considerando o revestimento executado com um único tipo de mistura (camada singular) ou com dois tipos de mistura (camadas integradas). A análise dos resultados indicam que antes do primeiro ano de abertura ao tráfego os segmentos em camada singular já irão apresentar trincamento por fadiga, enquanto que, para o segmento com camadas integradas, os trincamentos começarão a aparecer a partir do terceiro ano. As previsões indicam que o método vigente para o dimensionamento do pavimento não atende ao tráfego previsto para o período de projeto.

Palavras-chave: Pavimentação. Desempenho. Segmentos monitorados. Asfalto-borracha. Vida útil.

ABSTRACT

Practice has shown that roads with high traffic volume have presented a premature loss in performance related to structural and functional conditions. This fact has drawn attention to the need for change in project design, correct selection of materials, and meeting the executive and maintenance techniques. In this context, the Thematic Network of Asphalt Technology, sponsored by Petrobras, in conjunction with several Brazilian universities, implemented a study on the construction and monitoring of road segments in several regions of the country with the goal of forming a database on materials characterization and behavior, as well as processes and performance of pavement structures. From this database, a new method for dimensioning flexible pavements calibrated for the Brazilian reality will be developed. In Santa Catarina, as well as in other states stretches of highways have been selected to be followed during the implementation and monitored for structural and functional performance. In this study, the characterization of 5 segments inserted in the work of doubling BR-101/SC, are presented, as well as the performance prediction from the year of opening to traffic. The segments were followed from the step of materials characterization in the laboratory, technological control of the executive phase, performance of asphalt mixture through testing, such as resilient modulus, fatigue, permanent deformation, and evaluation of structural and functional conditions through inspection of deflections, irregularity, slippage cracks, and friction in the zero year of opening to traffic. It was also possible to estimate the service life for the pavements based on the modules obtained by back analysis of the deflection basins. In one of the segments, part of the coating layer was rubberized asphalt, making it possible to also evaluate the segment performance considering the coating with a single type of blend (single layer) or two kinds of blends (integrated layers). The analysis, indicate that, the segments in a single layer already started to crack due to fatigue before the first year of opening to traffic, while the segment with integrated layers will begin to present cracks from the third year on. The estimates indicate that the current method for scaling the surface does not meet the predicted traffic for the period of the project.

Key-words: Pavement. Performance. Monitored segments. Rubberized asphalt. Service life.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE QUADROS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	*American Association of State Highway Officials*
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
AFNOR	*Association Française de Normalisation*
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis
APL	Analisador de Perfil Longitudinal
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BPN	*British Pendulum Tester Number*
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBR	*Califórnia Bearing Ratio*
CDI	*Compaction Densification Index*
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPDM	Etileno Proprileno
ESRD	Eixo Simples de Roda Dupla
EVA	Acetato de Etil Viniílico
FWD	*Falling Weight Deflectometer*
GMR	Perfilômetro Dinâmico de Superfície
GN	*Grip Number*
IRI	Índice de Irregularidade Longitudinal
ISC	Índice de Suporte Califórnia
LCPC	*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*
LDI	Integrador de Deslocamentos Lineares Sul-Africano
MERLIN	*Mechine for Evaluating Rougnhess Using Lowcost Instrumentation*
NBR	Norma Brasileira
PI	Proctor Intermediário
PN	Proctor Normal
PVC	Policloreto de Vinila

QI	Quociente de Irregularidade
RBV	Relação Betume/Vazios
RT	Resistência à Tração
RTFOT	*Rolling Thin-Film Oven Test*
SBR	Estiireno Butadieno
SBS	Estireno Butadieno Estireno
SRTA	Sistema da Rede Temática de Tecnologia dos Asfaltos
TMN	Tamanho Máximo Nominal
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USACE	*United States Army Corps of Engineers*
VAM	Vazios do Agregado Mineral
VCB	Vazios Cheios de Betume
VRD	Valor de Resistência à Derrapagem
Vv	Volume de Vazios

LISTA DE SÍMBOLOS

#	Peneira
%	Porcentagem
°C	Grau Celsius
°F	Grau Fahenheit
cP	Centipoise
D	Diâmetro
h, H	Altura
Hz	Hertz
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
m	Metro
m^2	Metro quadrado
min	Minutos
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
$N_{inicial}$	Número de giros inicial
$N_{máximo}$	Número de giros máximo
$N_{projeto}$	Número de giros de projeto
p	Pressão de contato pneu/pavimento
Psi	Libra por polegada quadrada
q	Carga por roda
σ_t	Tração
σ_z	Compressão
E	Módulo resiliente ou módulo de elasticidade
υ	Coeficiente de Poisson
a	Raio do círculo de aplicação da carga
p	Pressão dos pneus
H_m	Altura média de areia
V	Volume
GN	*Grip Number* (coeficiente de atrito)
Fv	Força vertical
Fh	Força horizontal.
Tx	Macrotextura

a e b	Constantes para calibração
S	Velocidade de deslizamento
FR(S)	Coeficiente de atrito medido pelo dispositivo.
S	Velocidade
Sp	Constante de velocidade
F60	Resistência à derrapagem a 60 km/h
A, B, C	Constantes de regressão
MMPT	Temperatura média mensal do pavimento na profundidade z
MMAT	Temperatura média mensal do ar
Z	Profundidade na camada asfáltica
$VMDA_n$	Volume de tráfego no ano "n";
$VMDA_0$	Volume de tráfego no ano base;
I	Taxa de crescimento geométrico anual;
n	Número de anos para o período de projeto;
FD	Fator direcional
FR	Fator climático regional (adotado = 1,0); e
FV	Fator de veículo ponderado, sendo calculado com base na
SM	Segmento monitorado
AC	Asfalto convencional
AB	Asfalto-borracha
ε, $RMS\%$	Erros aceitáveis para o ajuste entre as bacias
MEA	Massa Específica Aparente
RT	Resistência à Tração por Compressão diametral
MR	Módulo médio obtido na série de ciclos de carga
Sd	Desvio padrão dos valores obtidos;
MR*	Média de todos os valores;
Sd*	Desvio padrão de todos os valores.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No Brasil, o sistema rodoviário é o meio preferencialmente utilizado para o transporte de cargas, ou seja, 61% da produção é escoada pelas rodovias. No tocante ao transporte de passageiros, predomina com 95% de participação (CNT, 2015).

Considerando a relevante importância que as rodovias desempenham na cadeia produtiva do país, a qualidade destas influencia diretamente nos custos dos produtos e na competitividade de mercado.

A falta de investimentos em manutenção, o excesso de cargas transportadas e o progressivo aumento da frota de caminhões em circulação são fatores que contribuem para a degradação do pavimento. Associado a estes, tem-se um método de dimensionamento de pavimentos flexíveis desenvolvido há quase cinquenta anos atrás, baseado em experiências nos Estados Unidos, que contempla um eixo padrão de dimensionamento de 8,2 tf enquanto que a carga legal atualmente é 10 tf (com 10% de tolerância, chegando a 11 tf).

A degradação extremamente precoce do revestimento tem alertado para a necessidade de melhorias na concepção dos pavimentos em muitas rodovias, que passa por mudanças no dimensionamento das estruturas, seleção de materiais mais eficientes e técnicas apropriadas de execução.

Nesse contexto, a Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, patrocinada pela Petrobras, em conjunto com diversas universidades brasileiras, implementou uma pesquisa sobre a construção e monitoramento de segmentos rodoviários em várias regiões do país. O objetivo é a formação de um banco de dados sobre caracterização e comportamento de materiais, processos executivos e desempenho de estruturas de pavimentos. A partir desse banco de dados será desenvolvido um novo método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, adequado à realidade brasileira.

Para elaboração de um método de dimensionamento mais racional, além da aplicação de programas que permitam a avaliação de tensões e deformações, contemplando critérios de ruptura, é necessário que se possa calibrar o método a partir da realização de ensaios de laboratório e avaliação do desempenho em campo. Assim, é possível empregar com maior confiabilidade os resultados obtidos em ensaios laboratoriais e análises mecanísticas. Contudo, para a calibração do método é necessário o monitoramento das condições estruturais e

funcionais dos pavimentos, conhecimento do tráfego solicitante e das condições ambientais do local.

Em Santa Catarina foram executados, entre 2011 e 2012, 9 segmentos que estão sendo monitorados quanto ao seu desempenho estrutural e funcional. Destes segmentos, 5 são em rodovia federal (BR-101/Araranguá), com elevado volume de tráfego, os outros 4 são em rodovias estaduais, sendo que 1 dos segmentos é em rodovia com médio volume de tráfego (SC-415/Itapoá) e 3 em rodovia com baixo volume de tráfego (SC-486/Urubici).

Nesta dissertação, será apresentada a caracterização dos materiais empregados e o controle tecnológico de execução dos 5 segmentos localizados na BR-101. No entanto, a caracterização sob o aspecto funcional e estrutural no ano zero, bem como, a estimativa de vida útil foi realizada para apenas 3 segmentos.

Os segmentos estão localizados no contorno do município de Araranguá e possuem infraestrutura idêntica ao pavimento projetado originalmente para o restante da obra, exceto a camada de revestimento. Em quatro segmentos, a camada de revestimento foi executada com a mesma mistura (revestimento singular) enquanto que em um segmento uma parte da camada do revestimento foi executada em asfalto-borracha, aplicando-se o conceito de camadas integradas.

O trabalho foi divido em duas fases: na primeira delas, está contemplada a fase de execução dos segmentos monitorados, onde foram caracterizados os materiais utilizados e o controle executivo do pavimento. Nesta fase, ainda foram realizados ensaios de desempenho da mistura asfáltica, tanto em corpos de prova moldados em laboratório como em corpos de prova extraídos da mistura asfáltica executada em campo. Na fase subsequente, os segmentos monitorados foram analisados quanto às condições estruturais e funcionais e a partir destes resultados e ensaios de laboratório, fez-se a estimativa de vida útil do revestimento no ano zero da abertura ao tráfego.

Ressalta-se que a Rede Temática não teve qualquer interferência no dimensionamento da estrutura e no processo executivo dos segmentos, tendo-se em conta que o objetivo dos segmentos monitorados é que eles retratem o estado da arte empregado pelo órgão federal e estadual no dimensionamento e controle de execução da malha rodoviária sob sua jurisdição.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal da pesquisa é verificar o comportamento estrutural e funcional dos pavimentos asfálticos de 5 segmentos monitorados inseridos nas obras de duplicação da rodovia BR-101 no município de Araranguá-SC.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Descrever as técnicas construtivas empregadas e realizar a caracterização física e mecânica dos materiais utilizados;

- Avaliar o desempenho das misturas asfálticas a partir da realização de ensaios desempenho (fadiga e deformação permanente) em placas extraídas em campo e em placas moldadas em laboratório;

- Avaliar a condição estrutural e funcional dos segmentos monitorados no ano de abertura ao tráfego através de levantamentos de deflexão, irregularidade, afundamento de trilha de rodas e atrito;

- Avaliar o comportamento mecânico dos materiais em campo através da técnica da retroanálise das bacias de deformação obtidas através de levantamentos deflectométricos (FWD) e juntamente com os resultados dos ensaios de laboratório, estimar a vida útil dos segmentos monitorados no ano zero de abertura ao tráfego;

- Comparar o desempenho do segmento em que o revestimento é em camada singular com o segmento em que o revestimento foi executado com o conceito de camadas integradas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A pesquisa está dividida em 5 capítulos que explanam os seguintes conteúdos:

Capítulo 1: **Introdução**: Descreve a importância da pesquisa, os objetivos pretendidos e os métodos a serem seguidos para o alcance desses objetivos;

Capítulo 2: **Revisão Bibliográfica**: Apresenta os principais aspectos relacionados ao tema, constante na literatura.

Capítulo 3: **Método da Pesquisa e Materiais Utilizados**: Apresenta o estudo de tráfego e o dimensionamento da estrutura do pavimento constante no projeto executivo da rodovia. Apresenta também as características dos materiais, a dosagem, o controle empregado durante a construção, a caracterização quanto ao desempenho da mistura asfáltica e os procedimentos para a avaliação estrutural e funcional dos segmentos e a estimativa de vida útil dos mesmos.

Capítulo 4: **Apresentação e Análise dos Resultados**: Este capítulo apresenta os resultados da caracterização dos materiais, do controle tecnológico de execução, os resultados dos levantamentos das condições estruturais e funcionais e a estimativa de vida útil dos pavimentos.

Capítulo 5: **Conclusão**: O último capítulo traz a explanação das principais conclusões e algumas recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSTITUIÇÃO, CARACTERÍSTICAS E COMPORTAMENTO DOS PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

2.1.1 Generalidades

Os pavimentos, por injunções de ordem técnico-econômicas, são estruturas em camadas em que materiais de diferentes resistências e deformabilidade são colocados em contato, resultando em um elevado grau de complexidade com relação ao cálculo de tensões e deformações atuantes, resultantes das cargas do tráfego (BRASIL$_A$, 2006).

Na concepção dos pavimentos flexíveis são utilizados, basicamente, dois grupos de materiais: na camada superior, denominada revestimento asfáltico, utilizam-se misturas de materiais granulares estabilizados com ligantes asfálticos, enquanto que, nas camadas subjacentes, designadas, base, sub-base e, eventualmente, reforço do subleito, utilizam-se materiais granulares estabilizados mecanicamente. O dimensionamento dessas camadas está diretamente relacionado com o tráfego e com as características do subleito (BRANCO *et al*., 2011).

O revestimento asfáltico, além de possuir impermeabilidade adequada para evitar que a água infiltre nas camadas inferiores, destina-se a melhorar as condições do rolamento dos veículos quanto a comodidade e segurança e resistir aos esforços horizontais atuantes na estrutura (MEDINA e MOTTA, 2005).

A base dos pavimentos é responsável por resistir e transmitir os esforços às camadas inferiores e ainda limitar o efeito das deformações no revestimento. As camadas de sub-base e reforço do subleito também são responsáveis por diminuir as cargas impostas ao subleito e são utilizadas sempre que for necessário reduzir os custos com as camadas superiores (BRASIL$_A$, 2006).

As diferentes camadas que compõem o pavimento dispõem-se, normalmente, com qualidade e resistência decrescentes de acordo com a progressiva redução dos esforços com a profundidade. A camada de revestimento devido sua propriedade de coesão, possui a capacidade de suportar esforços de tração, compressão e cisalhamento, já as camadas granulares, nas quais suas resistências dependem apenas do atrito interno, do entrosamento entre os grãos, resiste apenas a esforços de compressão e cisalhamento (BRANCO *et al*., 2011).

O desempenho adequado do pavimento relaciona-se à capacidade de suporte e à durabilidade compatível com o padrão da obra e o tipo de

tráfego, bem como o conforto ao rolamento e a segurança dos usuários. O desafio de projetar um pavimento reside no fato, portanto, de conceber uma obra de engenharia que cumpra as demandas estruturais e funcionais, além da atenção às questões econômicas (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

Por conseguinte, para que seja possível a obtenção de pavimentos que atendam simultaneamente condições estruturais e funcionais é necessário o conhecimento do comportamento dos materiais a serem utilizados diante das diversas solicitações impostas aos pavimentos.

2.1.2 Solicitações na Estrutura dos Pavimentos

Os pavimentos estão submetidos a cargas repetidas, itinerantes e em movimento que impõem solicitações particulares em cada ponto da estrutura.

As cargas do tráfego geram tensões no pavimento que são assumidas, por simplificação, como uma força vertical uniforme e aplicada em uma área circular, onde a pressão de contato é considerada igual a pressão de inflação dos pneus (MEDINA e MOTTA, 2005).

A intensidade e a forma de aplicação das cargas dos veículos predizem distintos tipos de comportamento nos pavimentos, principalmente porque materiais como o concreto asfáltico possuem desempenho dependente da forma como são solicitados. Além disso, as ações do meio físico, como temperatura e umidade influenciam de forma relevante nesse desempenho (BRANCO *et al.*, 2011).

Para o conhecimento das cargas a que os pavimentos estão submetidos, para fins de avaliação ou dimensionamento dos pavimentos, são realizadas contagens e pesagens dos veículos, onde, através de procedimentos pré-estabelecidos, os valores obtidos são convertidos para um número de repetição de um eixo padrão conhecido. A informação acerca das condições reais das cargas por eixo é fundamental para a previsão das tensões e deformações que irão atuar na estrutura decorrente da ação do tráfego (MINHOTO, 2005).

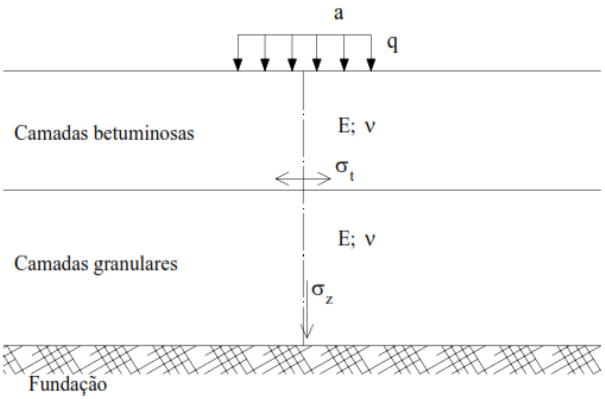
A temperatura do ar e a atuação da luz solar provoca o envelhecimento da mistura asfáltica, influenciando na rigidez do material que varia no sentido inverso da temperatura. A água que infiltra no pavimento, seja pela superfície ou pelos taludes, atua na deformabilidade das camadas granulares e do subleito. A ação da água tem efeito imediato na diminuição do atrito interno entre os granulares, onde os efeitos dessa ação irão depender da maior ou menor

sensibilidade a água por parte do solo de fundação e das camadas granulares (BRANCO *et al*., 2011).

A repetição das cargas acarreta fissuração decorrente da tração na parte inferior da camada de revestimento, levando ao trincamento por fadiga. Os esforços de compressão, devido as cargas do tráfego ao longo do tempo, geram consolidação nas camadas granulares e no solo de fundação devido a densificação dos agregados e/ou a ruptura por cisalhamento, tendo como consequência a deformação permanente da estrutura (BRANCO *et al*., 2011).

Conforme mostrado na Figura 2.1, quanto aos esforços sofridos pela estrutura, e que usualmente são utilizados para a avaliação do comportamento dos pavimentos, destaca-se a tração (σ_t) embaixo da fibra inferior da camada de revestimento asfáltico e a compressão (σ_z) no topo do subleito. E e υ são os parâmetros de deformabilidade dos materiais: módulo resiliente ou módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson e a e q se referem ao raio do círculo de aplicação da carga e a pressão dos pneus, respectivamente (PEREIRA E PICADO-SANTOS (2002, *apud* MINHOTO, 2005).

Figura 2.1 - Esforços atuantes na estrutura do pavimento devido ao tráfego



Fonte: Pereira e Picado-Santos (2002, *apud* MINHOTO, 2005).

2.1.3 Degradação dos Pavimentos Flexíveis

Alguns materiais, quando respeitado certo limite de deformação, poderão suportar um número ilimitado de solicitações. Mas, de maneira geral, isso não ocorre com os materiais asfálticos, pois sempre que

solicitados, tendem a apresentar deformação permanente e a atingir a fadiga (MOMM, 2004).

A repetição das cargas das rodas dos veículos solicita à flexão o revestimento asfáltico, onde, iniciam-se trincas, geralmente na parte inferior da camada, daí, propagam-se pra cima até atingir a superfície (MEDINA e MOTTA, 2005).

Ainda, a camada de revestimento está sujeita a um trincamento com origem na superfície ocasionado por grandes tensões de tração junto aos bordos dos pneus e variação térmica de grande amplitude (MINHOTO, 2005). Esse tipo de trincamento se origina na superfície e evolui para o interior do revestimento e está atrelado a fatores como maior espessura necessária de revestimento devido ao aumento do tráfego, maior pressão de inflação dos pneus, utilização de eixos simples ao invés de duplos e consequentemente maior carga transportada por eixo, além das condições climáticas e do tipo da mistura (FREITAS, 2004 *apud* DIAS, 2009).

Dias (2009) relatou algumas pesquisas no âmbito de mecanismos de degradação de pavimentos. Nessa pesquisa, os autores concluiram que as causas do aparecimento de trincas na superfície são os efeitos da combinação tráfego-temperatura, principalmente quando a temperatura do pavimento sofre um resfriamento instantâneo devido a ciclos dia e noite ou chuvas no verão. Esses ciclos, fazem com que a superfície do revestimento fique mais rígida que o restante da camada, acarretando em tensões diferenciais.

A superfície do revestimento também torna-se rígida pelo processo de envelhecimento da mistura devido a exposição aos agentes climáticos, acarretando também no trincamento com origem na superfície. A camada de revestimento também pode ficar suscetível a outros tipos de trincamento, como às decorrentes de variações térmicas, onde a capacidade do revestimento em dissipar as tensões geradas pela contração e dilatação térmica é excedida, porém esse efeito é pouco comum em nosso país.

Um outro fator que acarreta a perda de desempenho dos pavimentos asfálticos é a deformação permanente nas trilhas de rodas. A deformação permanente é um defeito que se caracteriza pela formação de desníveis na superfície do pavimento acarretando em irregularidades e consequente perda das condições de conforto ao rolamento. Também pode causar insegurança aos usuários tendo em vista o possível acúmulo de água e a diminuição do atrito entre pneu e pavimento.

Pode ser atribuída às subcamadas da estrutura, quando sujeitas a densificação adicional pelo tráfego ou ruptura por cisalhamento, sendo

minimizada pela seleção correta dos materiais, compactação adequada e dimensionamento apropriado (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

A deformação permanente também ocorre na camada de revestimento (deformação plástica), essa condição está relacionada com as características do ligante e com a volumetria da mistura. Condições de temperatura (época do ano), carregamento e velocidade do tráfego são fatores que contribuem para a intensificação desse tipo de defeito (MOURA, 2010).

Além dos fatores supracitados, a degradação dos pavimentos ainda pode ser influenciada por falhas durante o processo construtivo, falta de controle das características dos materiais utilizados, deficiência na drenagem, falta de intervenções de manutenção e, sobretudo, métodos impróprios de dimensionamento (FONTES, 2009).

Assim, como em nenhum outro tipo de estrutura, os pavimentos possuem uma componente aleatória muito elevada devido a todos os fatores influentes e principalmente a incapacidade de caracterização de todos esses fatores agindo simultaneamente. Em virtude disso, para a caracterização do comportamento das misturas em campo, privilegiam-se sempre aspectos considerados de maior relevância (BERNUCCI *et al.*, 2008; BRANCO *et al.*, 2011).

2.1.4 Materiais Constituintes

Os agregados têm a função de conferir ao concreto asfáltico um esqueleto mineral responsável pela estabilidade da mistura. O entrosamento ideal entre os agregados permite uma maior resistência ao cisalhamento, dessa forma, pode-se alcançar melhor comportamento através da seleção dos agregados baseados em suas caraterísticas de desempenho (FONTES, 2009).

As características dos agregados que influenciam nos parâmetros de desempenho do concreto asfáltico estão apresentadas no Quadro 2.1.

O papel do fíler (ou material e enchimento) nas misturas asfálticas é de preenchimento dos vazios dos agregados. No entanto, ele também altera as propriedades do ligante asfáltico pois atua como parte ativa do mástique (combinação de agregado miúdo, ligante, fíler e ar). O fíler atua no aumento da viscosidade do ligante, diminuindo a penetração e, simultaneamente, diminuindo a suscetibilidade térmica e elevando o ponto de amolecimento. A rigidez do mástique proporcionada pelo fíler acarreta em uma melhoria das propriedades de resistência à fadiga (a temperaturas intermediárias), ao aumento da

resistência a deformação permanente (a altas temperaturas) e a resistência ao trincamento térmico (BARDINE, *et al*., 2009).

O fíler utilizado na composição do concreto asfáltico pode ser natural (proveniente dos agregados), ou artificial como o pó calcário, a cal hidratada e o cimento Portland, conforme a norma DNIT 03/2004.

Quadro 2.1 - Propriedades dos agregados

Fase	Comportamento das misturas	Propriedade dos agregados
Execução	Trabalhabilidade	Granulometria
	Manutenção das características durante a usinagem e aplicação	Resistência ao desgaste e ao choque
Serviço	Resistência a fadiga Resistência a deformação permanente Rigidez	Granulometria Diâmetro máximo do agregado Dureza das partículas Resistência ao desgaste Textura e forma
	Atrito	Textura e forma Diâmetro máximo do agregado Resistência ao desgaste Dureza
	Macrotextura	Diâmetro máximo do agregado Granulometria
	Durabilidade	Composição química Suscetibilidade a água Adesividade Resistência ao desgaste
	Desgaste dos pneus Ruído e resistência ao rolamento	Diâmetro máximo do agregado Textura e forma

Fonte: Adaptado de Freire (2004).

Os cimentos asfálticos são produtos compostos de hidrocarbonetos, que devido suas propriedades de flexibilidade, resistência, impermeabilidade e durabilidade possuem uma ampla aplicação em pavimentação. Apresentam características físicas muito dependentes da temperatura a que se encontram e também do tempo e da velocidade do carregamento, por esta razão, são considerados materiais viscoelásticos e termossuscetíveis (HECK, 2001).

2.1.5 Caracterização do Concreto Asfáltico

A caracterização das propriedades do concreto asfáltico na estrutura do pavimento é bastante complexa tendo em vista que fatores como a configuração do tráfego (magnitude das cargas, frequência, tempo de duração), o estado de tensões e a atuação da temperatura influenciam na predição do seu comportamento (BERNUCCI *et al*, 2008). Ainda, fatores intrínsecos à mistura como teor e tipo de ligante, granulometria, tamanho máximo, aspereza e forma dos agregados, vazios da mistura, teor e tipo de fíler, compactação, também influenciam no seu desempenho.

Para a previsão do comportamento dos pavimentos flexíveis utilizam-se modelos convencionais, baseados na teoria da elasticidade linear e no carregamento estático. Contudo, esses modelos só caracterizam bem a resposta estrutural dos pavimentos se consideradas que os esforços são aplicados a baixa temperatura e elevada velocidade de carregamento, ou seja, para pequenas deformações, enquanto que para elevadas temperaturas e baixa velocidade de carregamento, os concretos asfálticos apresentam comportamento não-linear (VALE *et al*., 2006).

No domínio viscoelásticos linear o concreto asfáltico assume as seguintes características (DI BENEDETTO, 1990), *apud* MOMM, 2004).

- Homogeneidade: Apesar de sua constituição ser bastante heterogênea devido a composição granular, a homogeneidade macroscópica pode ser considerada em termos de escala da camada do pavimento.

- Isotropia: O modo como é aplicado o concreto asfáltico, ou seja, espalhamento da camada e compactação em passagens sucessivas de equipamentos compactadores, acarreta em um material com certa anisotropia (maior densidade na direção da espessura da camada). Para amenizar esse fator, as amostras para ensaios de módulo e fadiga são retiradas do núcleo das placas. No cálculo, essa condição simplificadora não gera diferenças significativa nos resultados.

- Viscoelasticidade: O concreto asfáltico herda as características do seu ligante, portanto para cargas aplicadas em um curto tempo de duração apresentam comportamento linear, já para cargas aplicadas em um longo período de duração, comportam-

se como materiais viscosos. Dentro desses extremos e em temperatura ambiente o material se comporta como viscoelástico, desde que sujeito a pequenas deformações.

- Linearidade: A linearidade é assumida do domínio das pequenas solicitações, onde são feitas as medidas de módulo.

A rigidez do concreto asfáltico é mais elevada a baixas temperaturas e curto tempo de carregamento, nesse caso o material comporta-se como elástico. Por outro lado, a rigidez é menor para altas temperaturas e longos períodos de carregamento, dessa maneira o material comporta-se como viscoso (PAIS, 1999, *apud* FONTES, 2009).

Na caracterização da rigidez do concreto asfáltico podem ser utilizados diferentes tipos de módulos. Entretanto, suas definições e os métodos de medida afetam seus valores, não podem ser considerados equivalentes. Em campo, os módulos podem ser estimados a partir dos levantamentos das deflexões e de sua linha de influência (bacia de deformação). Em laboratório, testes como os ensaios de módulo resiliente (axial, triaxial ou diametral) e de módulo dinâmico, permitem a simulação das cargas impostas pelo tráfego e sua atuação nos materiais.

2.1.5.1 Módulos das Misturas Asfálticas

A resiliência expressa a resposta dinâmica dos materiais submetidos a carregamentos repetidos (pulsantes) na sua componente elástica (que não é necessariamente linear). O termo foi proposto por Hveen na década de 40, que concluiu que a fadiga dos revestimentos tinha origem nas pequenas deformações elásticas da estrutura e passou a ser usado para designar a deformação elástica de forma a distinguir dos termos utilizados para outros materiais, tendo em vista que em nenhum outro tipo de estrutura tem-se cargas com características tão aleatórias no que diz respeito a intensidade, frequência e duração como as cargas impostas pelo trafego na estrutura dos pavimentos (MOTTA, 1991).

O ensaio de módulo resiliente define a relação entre a tensão repetida aplicada e a deformação reversível após certo número de solicitações, admitindo-se a hipótese de que após certo número de repetição o comportamento se torne elástico linear. Preconizado pela norma DNER-ME 133/94, utiliza corpos de prova cilíndricos moldados em laboratório, no compactador Marshall e também corpos de prova extraídos *in situ* através de sonda rotativa.

O módulo dinâmico é definido como “o valor absoluto de módulo complexo |E*| que define as propriedades elásticas dum material viscoelástico linear submetido a um carregamento sinusoidal”, sem períodos de repouso. Entretanto, o termo dinâmico deve ser utilizado somente para ensaios com efeitos de inércia não desprezáveis, os quais estão relacionados com o movimento da massa do provete ou das partes do equipamento a ela ligadas. Para ensaios clássicos aqueles efeitos podem ser desprezados (CAPITÃO, 2003, *apud* FONTES, 2009).

Os ensaios de módulos podem ser divididos em duas categorias: ensaio homogêneos, nos quais tem-se acesso direto as tensões e deformações e os não homogêneos para os quais o acesso as tensões e deformações do material dependem das dimensões dos corpos de prova (DI BENEDETTO, 1990 *apud* MOMM, 2004).

De maneira geral, todos os ensaios determinam o módulo complexo a partir dos valores da força e da deformação aplicados nos corpos de prova e da defasagem existente entre os valores de força e deformação, aliados a fatores de forma (dimensão do corpo de prova) e fatores de massa (relativo aos efeitos da inercia na massa do corpo de prova e das partes móveis do equipamento) (DE LA ROCHE, 1996 *apud* MOMM, 2004).

A caracterização do módulo complexo implica na determinação das duas componentes |E*| e φ ou E1 e E2, para diferentes temperaturas e frequências. O comportamento reológico das misturas betuminosas pode ser representado através de diferentes variações entre seus componentes, como em função da variação da temperatura e da frequência, da relação entre as partes real e imaginária e dos módulos e ângulo de fase.

Quando a parte imaginária (E2) do módulo complexo for representada em função da parte real (E1) em coordenadas aritméticas, obtém-se uma curva única semelhante a um arco de círculo, independente da frequência e da temperatura. Essa representação é denominada Plano Cole-Cole (PARTL & FRANCKEN, 1998, *apud* FONTES, 2009).

2.1.5.2 Ensaio de Fadiga

O fenômeno da fadiga é descrito como sendo um processo de mudança estrutural permanente, localizado e progressivo que ocorre devido as solicitações que provocam tensões e deformações na estrutura e que após um número suficiente de repetições ou ciclos de

carregamento geram trincas e a ruptura completa do material (PREUSSLER & PINTO, 2001).

De acordo com Branco *et al*. (2011), as solicitações do tráfego provocam alterações em determinadas propriedades dos materiais, novas solicitações, mesmo que de igual valor das anteriores, irão agir sobre um material com propriedades diferentes, e assim sucessivamente. As repetições das solicitações vão alterando a resistência dos materiais e, aliadas a ação do clima, irão desencadear o processo de fadiga do concreto asfáltico e a consequente perda de resistência estrutural global dos pavimentos.

Segundo Abojaradeh (2003, *apud* MELO, 2014) fatores como baixa espessura do concreto asfáltico, elevado carregamento e pressão dos pneus, irregularidade superficial, camada de base não cimentada, solo do subleito com elevado grau de resiliência e redução da rigidez das camadas de base, sub-base e subleito em decorrência de elevado teor de umidade são fatores que elevam o estado de tensão e deformação na base da camada de revestimento, diminuindo a resistência ao trincamento por fadiga.

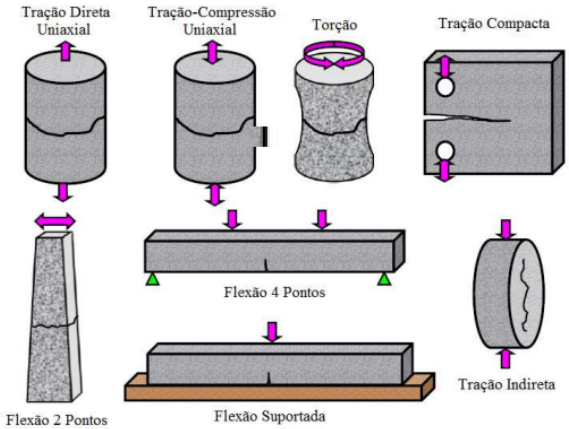
O ensaio de fadiga determina o número de solicitações necessárias para que uma determinada carga ocasione a ruptura do material. O critério de ruptura pode ser estabelecido em função de um certo nível de redução da rigidez do material ou pela ruptura total do corpo de prova.

Em laboratório, o carregamento pode ser aplicado em tensão controlada, onde a carga ou amplitude do carregamento permanece constante e as deformações aumentam no decorrer do ensaio, ou em deformação controlada, onde a deformação ou amplitude da deformação é mantida constante e isso induz a uma diminuição da carga ao longo do tempo. Nos ensaios a tensão controlada o critério de fadiga está associado a fratura da amostra. Nos ensaios a deformação controlada, o critério de fadiga está condicionado a uma perda de rigidez, pré-estabelecida geralmente, em torno de 50% da perda de rigidez do material (PINTO, 1991).

O tipo de solicitação que ocorre nos pavimentos sob a ação do tráfego é difícil de ser caracterizado devido as tensões tangenciais que são geradas. Em laboratório, apesar de ser possível a aplicação de cargas de formas variadas, essas ondas se mantem iguais no decorrer do tempo, a maioria dos carregamentos não reproduz exatamente as condições reais, embora sirvam para avaliar os módulos e características de fadiga para certas condições de carga (CAPITÃO, 2003, *apud*, FONTES, 2009).

Nas últimas décadas, diferentes metodologias de predição do desempenho à fadiga foram desenvolvidas. A qualidade do resultado depende de fatores como forma de simulação do carregamento, apoios, estado de tensão e meio ambiente (MELO, 2014). A Figura 2.2 mostra alguns testes disponíveis para a realização dos ensaios de fadiga.

Figura 2.2 - Ensaios de fadiga



Fonte: Zenaida (2012, *apud* Melo, 2014).

No âmbito deste trabalho, a caracterização do comportamento a fadiga da mistura asfáltica foi realizada utilizando-se o aparato 4 pontos em flexão alternada.

2.1.5.3 Ensaio de deformação permanente

A deformação permanente na camada de revestimento está intimamente ligada a aspectos de sua formulação, enquanto que nas demais camadas, é dependente da estrutura como um todo. Na camada asfáltica, a deformação permanente se dá, sobretudo, por um fenômeno de fluência do material, onde, o gradiente térmico exerce maior influência que o estado de tensões, tendo em vista, a suscetibilidade dos materiais asfálticos à temperatura. Para se ter misturas asfálticas resistentes a deformação permanente é importante, sobretudo, ter-se misturas com alto teor de agregados angulosos, baixa percentagem de ligante, este, pouco suscetível a temperatura e teor ótimo de vazios. (MOTTA, 1991).

A deformação permanente na camada asfáltica se deve a uma combinação do fluxo do material (viscoelástico ou viscoplástico) e do dano nesse material, traduzido pelo aparecimento e a propagação de trincas (BERNUCCI, *et al*., 2008). Irregularidades no perfil longitudinal e transversal dos pavimentos são causadas pela deformação permanente, que acarreta, além de problemas estruturais, como trincas, a perda do conforto e segurança para os usuários.

Para as subcamadas da estrutura, a deformação permanente já não é influenciada tanto pela temperatura e sim pelo estado de tensões, pelos níveis de carregamento, umidade, compacidade e em função das características dos agregados (LUZIA, 2008).

Os ensaios normalmente utilizados para a caracterização dos materiais asfálticos quanto a deformação permanente são: ensaios de aplicação de cargas estáticas ou repetidas (ensaios de compressão simples, compressão triaxial e ensaio cisalhamento) e ensaios de cargas rolantes (em laboratório ou escala real).

No âmbito dessa pesquisa, as misturas asfálticas foram caracterizadas com relação ao desempenho à deformação permanente através do ensaio de cargas rolantes em laboratório, preconizado através da norma francesa AFNOR NF P 98-253 – *Essais Relatifs Aux Chaussées, Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarnonés*.

O equipamento utilizado consiste em um simulador de tráfego dotado de um eixo simples de roda simples que percorre a superfície de duas placas de concreto asfáltico, simultaneamente, a uma frequência de 1 Hz. O carregamento aplicado é de 5 kN e a pressão de inflação dos pneus é de 0,6 MPa. O ensaio é conduzido a uma temperatura de 60°C e as placas são submetidas a 30000 ciclos (um ciclo é igual duas passagens, ida e volta). As leituras dos afundamentos na trilha de rodas são feitas nos estágios: 100; 1000; 3000, 10000, 30000 ciclos, medidas em 15 pontos diferentes da superfície das placas. A média das deformações em cada ciclo serve para avaliar a evolução dos afundamentos *versus* o número de ciclos aplicados. O limite da deformação é de no máximo 10% da altura da placa (MELO, 2014).

2.2 ASFALTO-BORRACHA

2.2.1 Propriedades e benefícios do asfalto-borracha

A modificação dos ligantes utilizados em misturas asfálticas tem como objetivo atender as solicitações geradas pelo constante aumento das cargas impostas pelo tráfego nos pavimentos, visto que proporciona,

entre outros fatores, a diminuição da suscetibilidade térmica a altas temperaturas (aspecto atrelado ao aumento da resistência deformação permanente) e diminuição da rigidez a baixas temperaturas (contribuindo para a resistência ao trincamento), ou seja, um aumento significativo de desempenho quando comparado às misturas com ligantes convencionais. Este incremento de performance é desejável tendo em vista às variações climáticas (no nosso país, principalmente do ponto de vista de altas temperaturas ambientes) e também devido a heterogeneidade dos asfaltos convencionais em termos de sua procedência (MORILHA e GRECA, 2003).

Os processos de melhoramento dos ligantes, comumente utilizados, incluem a incorporação de plastômeros e elastômeros (GREEN, 1998, *apud* PINHEIRO, 2004).

Os plastômeros aumentam a rigidez do ligante e com isso aumentam também a resistência a deformação, no entanto, por serem mais rígidos, tendem a fratura. Os plastômeros comumente utilizados são acetato de etil-vinila (EVA), etileno-propileno (EPDM) e policloreto de vinila (PVC). Os elastômeros possuem a característica de melhorar o desempenho quanto a deformação permanente devido a rápida recuperação da deformação sofrida. Na pavimentação são utilizados elastômeros do tipo borracha natural, borracha de pneus, borracha de estireno-butadieno (SBR), estireno-batadieno-estireno (SBS), entre outras (PINHEIRO, 2004).

A borracha de pneus é adicionada às misturas betuminosas por meio de duas tecnologias distintas, quais sejam: processo seco e processo úmido. No processo seco, as partículas de borracha substituem parte dos agregados da mistura, originando o chamado concreto asfáltico modificado por adição de borracha. No processo úmido são adicionadas partículas finas de borracha moída de pneus inservíveis ao ligante, produzindo o chamado asfalto-borracha. (BERTOLLO, *et al*., 2002).

O ligante modificado em função das suas características poderá ser aplicado em diferentes tipos de revestimentos, seja em misturas asfálticas ou em revestimentos por penetração. As misturas asfálticas podem ser: descontínuas abertas (*open-graded*), descontínuas densas (*gap-graded*) e contínuas densas (*dense-graded*). O tratamento superficial pode ser simples ou duplo podendo funcionar como revestimento ou como membrana intermediária de absorção de trincas (MORILHA e GRECA, 2003).

Em geral, utilizam-se os mesmos critérios utilizados na avaliação das propriedades dos ligantes asfálticos convencionais para a avaliação

das propriedades do asfalto-borracha, acrescido ainda da avaliação quanto à recuperação elástica (FONTES, 2009).

As propriedades dos ligantes asfálticos que influenciam no comportamento das misturas são consideravelmente melhoradas a partir da incorporação de borracha de pneus, o que se traduz, evidentemente, em melhoria de desempenho das misturas asfálticas quando comparadas às misturas com ligante convencional.

Os benefícios alcançados pela modificação das propriedades dos ligantes com o uso de borracha nas misturas asfálticas são, de acordo como o *Asphalt Rubber Usage Guide* (CALTRANS, 2006):

- Melhoria da durabilidade;
- Maior resistência à fadiga;
- Menor reflexão de trincas para a superfície;
- Maior elasticidade;
- Diminuição da sensibilidade térmica;
- Melhoria da resistência ao envelhecimento devido a maior espessura da película de ligante que envolve os agregados e de agentes antioxidantes presente na borracha;
- Melhoria da resistência a deformação permanente devido a maior viscosidade, ponto de amolecimento e resiliência; e
- Menores custos de manutenção devido a durabilidade e ao desempenho.

Alguns desses aspectos vem sendo demonstrados por autores e entidades em vários países através de pesquisas e aplicações de inúmeras técnicas envolvendo a aplicação da borracha na modificação de ligantes e misturas asfálticas.

2.2.2 Revestimento em Camadas Integradas

Tradicionalmente no Brasil, o revestimento de uma rodovia de elevado volume de tráfego é executado em um único tipo de mistura asfáltica, resultando em um revestimento dito singular.

Todavia, atualmente, com o desenvolvimento de misturas com elevado desempenho, é possível se executar o revestimento com o conceito de camadas integradas onde se poderá tirar proveito das características otimizadas quanto ao desempenho e melhor projetar a camada de revestimento. Neste conceito, pode-se utilizar em posições mais susceptíveis ao desenvolvimento de trincas por fadiga, misturas

com elevado desempenho à fadiga enquanto que em outras, misturas mais resistentes ao desenvolvimento de deformações permanentes.

2.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

2.3.1 Avaliação Estrutural

De maneira geral, todos os tipos de ações sofridas pelos pavimentos, notadamente, pela camada asfáltica, alteram as propriedades iniciais dos materiais, e, como as solicitações são processos interativos, o desempenho vai sendo progressivamente afetado até atingir um estado de ruína.

Para que isso não ocorra, recorrem-se a processos de recuperação das características inicias dos pavimentos, utilizando-se de atividades conhecidas como manutenção e reabilitação. Todavia, para que estas atividades possam ser corretamente planejadas é necessária a averiguação das condições em que se encontram os pavimentos. Faz-se isso, lançando mão de conhecidos métodos de avaliação, os quais analisam os pavimentos sobre o âmbito estrutural e funcional.

A avaliação estrutural dos pavimentos está baseada na verificação de sua capacidade de carga através do estudo das características de deformabilidade dos materiais utilizados (BORGES, 2001).

A avaliação da capacidade estrutural de pavimentos flexíveis engloba um conjunto de métodos que podem ser empíricos ou analíticos. Os métodos empíricos baseiam-se, principalmente, na observação no comportamento dos pavimentos quanto ao seu desempenho como estrutura, enquanto que, os métodos analíticos, analisam sua capacidade de carga (ANTUNES, 1999 *apud* FRANCISCO, 2012).

A avaliação estrutural pode ser efetuada através de vários tipos de equipamentos e procedimentos. Os métodos existentes classificam-se em métodos não destrutivos, representados pelas medidas de deflexão que avaliam a capacidade de carga dos pavimentos e métodos destrutivos, quando a investigação se caracteriza pela extração de amostras das camadas para posterior realização de ensaios laboratoriais (BERNUCCI, *et al*., 2008).

A deflexão é a medida da resposta do conjunto pavimento-subleito sob a ação de uma carga. Quando uma carga é aplicada na superfície todas as camadas fletem devido as tensões e deformações geradas pelo carregamento. O valor da deflexão geralmente diminui com

a profundidade e o distanciamento do ponto de aplicação da carga e depende do módulo de elasticidade das camadas (BRASIL$_B$, 2006).

Para fins de avaliação estrutural e como maneira de medir a capacidade de carga com o tempo, as medidas de deflexão são as mais adequadas, uma vez que podem ser feitas em grandes extensões. Possibilitam também a avaliação da linha de influência da carga a partir da bacia de deformação e correlaciona a deformabilidade com o aparecimento de defeitos nos pavimentos (ALBERNAZ, 1997).

A retroanálise é o procedimento analítico de obtenção de módulos elásticos "in situ" das camadas do pavimento e subleito, a partir da interpretação da bacia de deflexão obtida pela aplicação de um carregamento externo aplicado de valor conhecido (MACEDO, 1996).

Existem vários programas computacionais para a realização da retroanálise de pavimentos, sendo que a grande maioria deles emprega a teoria da elasticidade para a previsão dos módulos dos materiais. Na presente pesquisa foram medidas bacias de deflexão com a Viga Benkelman durante a fase de obra (outubro e novembro de 2012) e medidas de bacias com o FWD no mês da abertura ao tráfego (março de 2014).

A retroanálise das bacias medidas com a Viga Benkelman foi realizada com o programa Elsym5, utilizando-se como critério de convergência entre bacia medida e bacia calculada o erro médio relativo (FERNANDES, 2000).

Para a retroanálise das bacias medidas com o FWD foi utilizado o programa BAKFAA (http://www.airporttech.tc.faa.gov). Este programa foi desenvolvido pela FAA e é aplicado para retroanálise de bacias obtidas com o FWD. Utiliza como critério de convergência entre bacia calculada e bacia medida a raiz quadrática média dos erros (FERNANDES, 2000).

2.3.2 Avaliação Funcional

2.3.2.1 Defeitos de superfície

A avaliação funcional tem como princípio analisar a capacidade dos pavimentos em termos de conforto ao rolamento (defeitos e irregularidades) e a segurança (através da análise da interação pneu/pavimento).

Os defeitos podem aparecer precocemente em decorrência de erros no dimensionamento da estrutura, incoerência na seleção dos

materiais e, sobretudo, erros durante a construção (BERNUCCI, *et al.*, 2008).

Com o tempo, ainda ocorre a intemperização dos agregados minerais e dos materiais asfálticos devido às condições climáticas, auxiliadas pela ação desagregadora do tráfego (MEDINA e MOTTA, 2005).

Os defeitos nos pavimentos são medidos através de levantamentos visuais ou com auxílio de vídeos. São analisados e classificados quanto ao tipo, tamanho e severidade. A norma DNIT 005/2003-TER (BRASIL, 2003), estabelece as diretrizes para avaliação e classificação dos defeitos de superfície. Entre os tipos de defeitos que podem ocorrer nos pavimentos asfálticos estão as trincas, afundamentos, ondulação, escorregamento, exsudação, desgaste, panela e remendo.

A correta análise sobre o surgimento de defeitos na superfície dos pavimentos torna possível o conhecimento de suas causas e a previsão sobre suas condições futuras.

2.3.2.2 Irregularidade longitudinal

A irregularidade, atribuída aos desníveis da superfície de rolamento em relação à geometria da via, afeta diretamente a dinâmica dos veículos e contribui para o aumento do custo operacional. Engloba todas as distorções da superfície do pavimento, que podem provocar o deslocamento lateral e vertical do veículo. As distorções da superfície são causadas pelas cargas do tráfego que provocam deformações permanentes, por falhas construtivas ou ainda por problemas nas camadas de fundação dos pavimentos (HAAS *et al.*, 199; MARCON, 1996).

Além de intensificar o impacto que as cargas geram nos pavimentos, a irregularidade dificulta a drenagem superficial, fazendo com que a água se acumule sobre a superfície, comprometendo o desempenho do pavimento e a segurança para os veículos (PATERSON, 1987).

Os equipamentos destinados à medida da irregularidade de um pavimento podem ser agrupados da seguinte forma, de acordo com DNIT (BRASIL$_B$, 2006):

a) Sistemas de medidas diretas, onde as medidas são feitas, por exemplo, com emprego de equipamentos de topografia (nível e mira);

b) Sistemas de medidas indiretas, nos quais se enquadram os equipamentos que executam medidas mecanizadas do perfil da via, onde destacam-se: Perfilômetro Dinâmico de Superfície – GMR, o Perfilômetro AASTHO, o Analisador de Perfil Longitudinal – APL, o Perfilômetro CHLOE e o MERLIN do TRLL;

c) Sistemas tipo-resposta onde os equipamentos determinam acumulativamente o movimento entre o eixo traseiro do veículo e a sua carroceria. Como exemplo tem-se o Rugosímetro – BPR, Maysmeter, Bump Integrator, Integrador de Deslocamentos Lineares Sul-Africano – LDI, PCA roadmeter e Sistema Integrador IPR/USP;

d) Sistemas sem contato que baseiam-se na reflexão de uma onda, ou raio *laser* emitido por dispositivos instalados num veículo. Destacam-se nessa categoria os Perfilômetros à *laser*, como o utilizado nessa pesquisa.

Os equipamentos citados medem o perfil longitudinal de um pavimento ou as respostas de um veículo às distorções da superfície. Quando se mede o perfil tem-se a necessidade de transformar os valores em um índice estatístico para facilitar o entendimento. No caso do uso dos equipamentos tipo-resposta é necessário correlacionar os valores coletados com uma escala comum que permita a comparação entre as medidas feitas com diferentes equipamentos (HASS *et al.*, 1995, *apud* MARCON, 1996).

Quanto ao efeito da irregularidade nos custos de manutenção de uma rodovia se deve principalmente à diminuição da vida útil dos pavimentos devido a ação dinâmica das cargas. Conforme Saleh *et al.*, 2000 (*apud* MATTOS, 2014), um veículo trafegando em uma superfície plana e regular causa um determinado tipo de ação na estrutura do pavimento devido a carga aplicada por seus pneus, no entanto, se esta superfície for irregular o dano será maior devido a suspensão do veículo aplicar em alguns pontos uma carga maior do que na situação anterior.

A verificação das condições de irregularidade dos pavimentos apenas se torna útil se permitir atribuir uma determinada classificação ao pavimento com base em um objetivo a ser alcançado, quer seja na construção, na evolução do desempenho e na avaliação de estratégias de conservação (BRANCO, *et al.*, 2011).

O Quadro 2.2 mostra os conceitos aplicados às rodovias, indicados pelo DNIT ($BRASIL_B$, 2006) quanto aos níveis de irregularidade longitudinal.

Quadro 2.2 - Conceito atribuído às rodovias com base na irregularidade

Conceito	Irregularidade	
	QI (cont./km)	IRI (m/km)
Excelente	13-25	1-1,9
Bom	25-35	1,9-2,7
Regular	35-45	2,7-3,5
Ruim	45-60	3,5-4,6
Péssimo	>60	>4,6

Fonte: $BRASIL_B$ (2006).

2.3.2.3 Aderêcia pneu-pavimento

A aderência é definida como a capacidade para mobilizar forças de atrito entre um pneu de um veículo e a superfície do revestimento sob vários tipos de efeitos de estimulação do condutor. Ela permite ao veículo manter em todos os momentos a trajetória desejada; reduzir a distância de frenagem e paradas e garantir manobras de urgência (SETRA, 1993 *apud* TANG, 2007).

Conforme Ferreira (2002), dentre as qualidades fundamentais dos pavimentos que são segurança, conforto e economia, a mais importante, do ponto de vista do usuário é sem dúvida a segurança. Dessa forma, os aspectos relacionados a aderência pneu-pavimento devem ser sempre garantidos, possibilitando que os veículos consigam realizar a trajetória desejada.

Uma das consequências do tráfego é polir constantemente a superfície dos revestimentos. Esse polimento leva a diminuição das condições de aderência (TANG, 2007).

O nível de aderência pneu-pavimento depende de fatores como: as características dos pneus, a presença de água na superfície e, de maior relevância, a textura do revestimento, que são definidas através de duas escalas de textura: a macrotextura e a microtextura.

Características dos pneus

A profundidade dos sulcos dos pneus tem um impacto significativo sobre a drenagem da água que se acumula na superfície do pavimento. A água acumulada no pavimento pode ser expulsa através

dos canais previstos pela textura da superfície do pavimento e os sulcos dos pneus. Alguns estudos relataram uma diminuição do atrito molhado de 45% a 70% para os pneus completamente desgastados, em comparação com novos (HENRY, 1983, *apud* NCHRP, 2009).

A baixa inflação dos pneus pode diminuir significativamente o atrito em altas velocidades, devido ao centro da banda de rodagem tender a entrar em colapso e se tornar muito côncavo, além de fechar os canais de drenagem proporcionados pelos sulcos. O efeito é o de puxar e reter água da superfície do pavimento em vez de permitir que a água flua. Já o excesso de inflação, por outro lado, faz com que se tenha apenas uma pequena perda de atrito (NCHRP, 2009).

Presença de água

Quando a superfície do pavimento encontra-se completamente seca, observa-se a situação em que não há riscos de falta de aderência, pois há um maior contato entre o pneu e o pavimento. Portanto, as situações em que a superfície do pavimento está molhada desperta um maior interesse, visto que a presença de água representa uma barreira ao contato, podendo acarretar a derrapagem, fato que justifica a intensificação dos estudos nessas condições (FERREIRA, 2002).

O efeito da película de água no atrito é mínimo a baixas velocidades (32 km/h) e aumenta significativamente para velocidades mais altas (> 64 km/h) (NCHRP, 2009).

Macrotextura

A macrotextura é a rugosidade do pavimento formada pelos desvios de superfície nas dimensões dos granulares que formam a constituição do concreto asfáltico e afetam, basicamente, as condições de drenabilidade da água na área de contato pneu-pavimento e de deformabilidade da banda de rodagem do pneu, definidoras do gradiente de aderência à alta velocidade (MOMM, 1998).

Nessa pesquisa foi utilizado o ensaio de Mancha de Areia (ASTM D 965), para a avaliação superficial dos pavimentos quanto à macrotextura. O ensaio consiste em espalhar, com movimentos circulares de um dispositivo apropriado (espalhador de madeira com revestimento de borracha) na superfície do pavimento, um volume conhecido de areia ou microesferas de vidro (25000mm³ ± 150mm³). Mede-se o tamanho da mancha em 4 direções e então, com a média, calcula-se a altura da macrotextura, ou altura de areia, pela Equação 2.1

$$H_m = \frac{4V}{\pi D_m^2} \quad (2.1)$$

onde:
H_m = altura média de areia;
V = volume;
Dm= média das medidas da mancha na superfície do pavimento.

O Quadro 2.3 apresenta as classes de macrotextura especificadas no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT ($BRASIL_B$, 2006).

Quadro 2.3 - Classes de macrotextura

Classificação	Profundidade média (mm)
Muito fina	< 0,20
Fina	0,21 - 0,40
Média	0,41 - 0,80
Grossa	0,81 - 1,20
Muito Grossa	>1,20

Fonte: $BRASIL_B$ (2006).

Microtextura

A microtextura corresponde à distribuição espacial das asperezas na superfície dos granulares componentes do revestimento, capazes de interagir com a banda de rodagem do pneu, rompendo o filme de água. A existência dessas asperezas é devida principalmente às características mineralógicas e à estrutura dos granulares.

Os granulares são responsáveis pelo bom desempenho da microtextura, devendo, portanto, apresentar e conservar as arestas vivas durante o maior tempo possível, resistir ao uso (dureza e durabilidade) e oferecer uma boa resistência ao polimento decorrente do tráfego (NCHRP, 2009).

A medição do atrito do pavimento (microtextura) para verificação do valor de resistência a derrapagem pode ser obtida por meio de avaliações com o Pêndulo Britânico (ASTM E 303). O princípio de funcionamento desse equipamento é a perda de energia de um pêndulo com sapata de borracha (simulando a superfície do pneu) ao deslizar sobre a superfície do pavimento. Os valores obtidos no ensaio representam o VRD (Valor de Resistência à Derrapagem) ou, em inglês, BPN (*British Pendulum Tester Number).*

O Quadro 2.4 apresenta as classes de microtextura especificadas no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT ($BRASIL_B$, 2006).

Quadro 2.4 - Classes de resistência a derrapagem

Classificação	VRD – Valor de Resistência a Derrapagem
1 – Perigosa	< 25
2 – Muito lisa	25 – 31
3 – Lisa	32 – 39
4 – Insuficientemente rugosa	40 – 46
5 – Medianamente rugosa	47 – 54
6 – Rugosa	55 – 75
7 – Muito rugosa	>75

Fonte: $BRASIL_B$ (2006).

Nesse estudo, para as medições do atrito na superfície dos pavimentos foram utilizados, além do Pêndulo Britânico, o *Grip Tester*.

O *Grip Tester* trata-se de um equipamento rebocável que mede o atrito através do bloqueio ou arraste dos pneus (simulando a frenagem) sobre o pavimento. O veículo que reboca o equipamento é equipado com um tanque de 500 litros de água e equipamento controlador de vazão desta espargindo-a sob a roda teste proporcionalmente para cada velocidade de levantamento, de modo a garantir um filme de água de espessura fixa de 1,0 mm (COPPETEC, 2014).

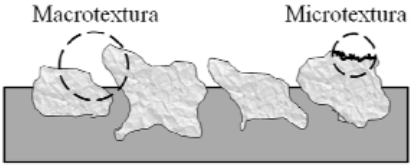
O *Grip Tester* mede o coeficiente de atrito (*Grip Number*) externado pela superfície do revestimento em relação à roda teste do equipamento. A borracha do pneu da roda teste é padronizada segundo a norma ASTM E 1844. Tanto a força vertical quanto a horizontal são medidas continuamente por tensiômetros (*strain gages*) e os valores médios calculados e exibidos na tela do computador de bordo a cada dez metros do levantamento, juntamente com os valores médios da velocidade desenvolvida pelo equipamento. A Equação 2.2 é utilizada para cálculo do coeficiente de atrito, ou *Grip Number* (GN) é:

$$GN = \frac{F_v}{F_h}, \tag{2.2}$$

onde:
GN = *Grip Number* (coeficiente de atrito);
Fv = força vertical; e
Fh = força horizontal.

A Figura 2.3 mostra a representação da macrotextura e microtextura.

Figura 2.3 - Representação da macrotextura e microtextura



Fonte: Mattos (2009).

Índice Internacional de Atrito (IFI)

A determinação do IFI é feita em função dos valores da textura (macrotextura) e do atrito (microtextura). Foi estabelecido através de uma pesquisa internacional de comparação entre os métodos de medidas de textura e atrito dos pavimentos realizada pela PIARC (*Permanent International Association of Road Congress*).

O IFI relaciona o atrito com a velocidade de deslizamento e pode estimar a constante de referência de velocidade (Sp) e o atrito a 60 km/h (F60) de um pavimento. O par de valores, Sp e F60, expressam o IFI de um pavimento e permitem calcular o valor do atrito F(S), a qualquer velocidade de deslizamento (APS, 2006; FONTES, 2009).

O IFI é calculado através da norma ASTM E 1960 (1998*), Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface*. Baseia-se em um modelo matemático (modelo PIARC) do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento e da macrotextura. Com o valor obtido da textura, por meio de ensaio Mancha de Areia, calcula-se a constante de velocidade (Sp) com a Equação 2.3:

$$Sp = a + b.Tx \qquad (2.3)$$

onde:
Tx = macrotextura (mm);
a e b = constantes para calibração para o dispositivo de medição de textura determinada no experimento internacional (-11,6 e 113,6, respectivamente).

A medição de atrito é ajustado para calibração da velocidade de deslizamento de 60km/h (Equação 2.4):

$$FR(60) = FR\ (S).\ e^{[(S-60)/Sp]} \qquad (2.4)$$

onde:
S = velocidade de deslizamento do dispositivo de medição;
FR(S) = coeficiente de atrito medido pelo dispositivo.
S = velocidade, tabelada pelo experimento para o equipamento escolhido (km/h).
Sp = constante de velocidade (Equação 2.3).

No caso do equipamento *Grip Tester*, para o valor de S, foi utilizado a velocidade média de realização do ensaio (24,13 km/h) por se tratar de equipamento com roda bloqueada. Para o cálculo com os resultados do ensaio com o Pêndulo foi utilizado o valor de 10 km/h constante na norma.

O valor de atrito calibrado para uma velocidade de deslizamento de 60 km/h é calculado utilizando-se a Equação 2.5:

$$F60 = A+B.FR(60)+C.Tx \qquad (2.5)$$

onde:
F60 = resistência à derrapagem a 60 km/h (adimensional);
A, B, C = constantes de regressão determinadas pela PIARC;
FR(60) = valor da resistência à derrapagem para um coeficiente de atrito FRS mesurado a velocidade de 60 km/h;
Tx = macrotextura (mm).

Como na pesquisa utilizaram-se dois equipamentos para as medições de atrito, têm-se os seguintes valores para as constantes A, B e C:

- Grip Tester: A=0,08209; B=0,91040 e C=0;
- Pendulo Britânico: A=0,05626; B=0,00756 e C=0.

O Índice Internacional de Atrito é então apresentado como IFI (F60, Sp). O modelo da PIARC também pode ser ajustado o valor de IFI para outro valor de referência de deslizamento por meio da Equação 2.6:

$$F(S) = F60.\ e^{[(60-S)/Sp]} \qquad (2.6)$$

onde:
F(S) = resistência à derrapagem a qualquer velocidade de deslizamento (adimensional);
F60 = resistência à derrapagem a 60 km/h (adimensional);
S = velocidade escolhida (km/h);
Sp = constante de velocidade (Equação 2.3).

Por definição, os pares de valores Sp e F60 designam-se como o IFI de um pavimento. Com eles é possível traçar a curva de referência estimada de atrito *versus* velocidade de deslocamento.

A partir dos valores de textura (Tx) e atrito (FRs) obtidos nos ensaios foi calculado o IFI de cada segmento através da norma ASTM E 1960 – *Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface.*

Para a classificação do IFI dos segmentos foram utilizadas as faixas limite constantes no Quadro 2.5:

Quadro 2.5 - Faixas limites de valores de IFI

Classificação	Profundidade média (mm)
Péssimo	< 0,05
Muito ruim	0,06 - 0,08
Ruim	0,09 – 0,11
Regular	0,12 – 0,14
Bom	0,15 – 0,21
Muito Bom	0,22 – 0,35
Ótimo	>0,35

Fonte: Aps (2006).

2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE MÉTODOS DE DIMESNIONAMENTO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NO BRASIL

2.4.1 Abordagem sobre os modelos de dimensionamento utilizados no país

Diversas pesquisas, no mundo inteiro, buscam encontrar formas de modernizar os métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis existentes. O objetivo principal das pesquisas é diminuir a parcela de empirismo empregada através do conhecimento das variáveis que influenciam no comportamento da estrutura tais como as características

dos materiais empregados, o comportamento em relação à aplicação das cargas, o carregamento e o tipo de resposta da estrutura às variações climáticas (FRANCO, 2007).

No Brasil, inicialmente, utilizou-se de métodos estabelecidos de forma totalmente empírica, como o conhecido método do CBR (*Califórnia Bearing Ratio*), que foi desenvolvido pelo departamento de estradas da Califórnia e adotado pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos USA(USACE) para projeto de pavimentos de aeroportos durante a segunda guerra mundial. A determinação das espessuras dos pavimentos baseava-se no índice de suporte, no tráfego, carga máxima por roda e em fatores ambientais (MOTTA, 1991).

Em 1966, o engenheiro Murilo Lopes de Souza, empregou os conceitos oriundos dos testes em pistas experimentais da USACE e da AASHTO e do trabalho intitulado "*Design of Flexible Pavements Mixed Loads and Traffic Volume*" publicado por W.J. Tumbull, C. R. Foster e R. G Ahlvin, em 1962. A metodologia proposta foi alicerçada na capacidade de suporte do subleito, na classificação dos materiais granulares, no tráfego, no coeficiente estrutural e espessura mínima de revestimento (COUTINHO, 2011).

Após a década de 60, com o surgimento e difusão de novas tecnologias, pode-se estudar os pavimentos como sistemas em camadas e considerar a deformabilidade dos materiais na estrutura. O conhecimento, até então empírico, passou a ser racionalizado através da abordagem mecanicista (MOTTA, 1991).

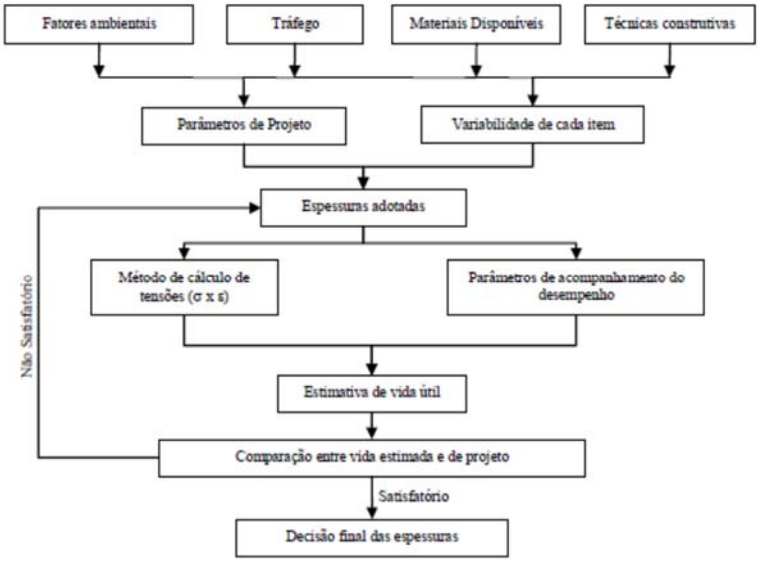
Em 1978, o Instituto de Pesquisas Rodoviárias do Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (IPR/DNER) juntamente com a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/COPPE) iniciaram uma pesquisa com o objetivo de considerar a resiliência na avaliação estrutural de pavimentos, bem como, no dimensionamento de reforços. Em 1982 foi proposto pelos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler à comunidade rodoviária, um procedimento para projeto de reforço de pavimento flexível que permite considerar explicitamente as propriedades resilientes dos materiais constituintes dos pavimentos.

No decorrer dos anos, foi possível validar o método proposto a partir de dados de campo referentes a trechos recapeados e enfim oficializá-lo por meio do procedimento DNER-PRO 269/94.

Desde então, métodos analíticos para o dimensionamento de pavimentos asfálticos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos e vários autores apresentam diagramas com um procedimento detalhado e bastante característico para a definição da espessura das camadas. Um exemplo está mostrado na Figura 2.4 do esboço de um método proposto

por Motta (1991) pautado sobre os procedimentos racionais da Mecânica dos Pavimentos.

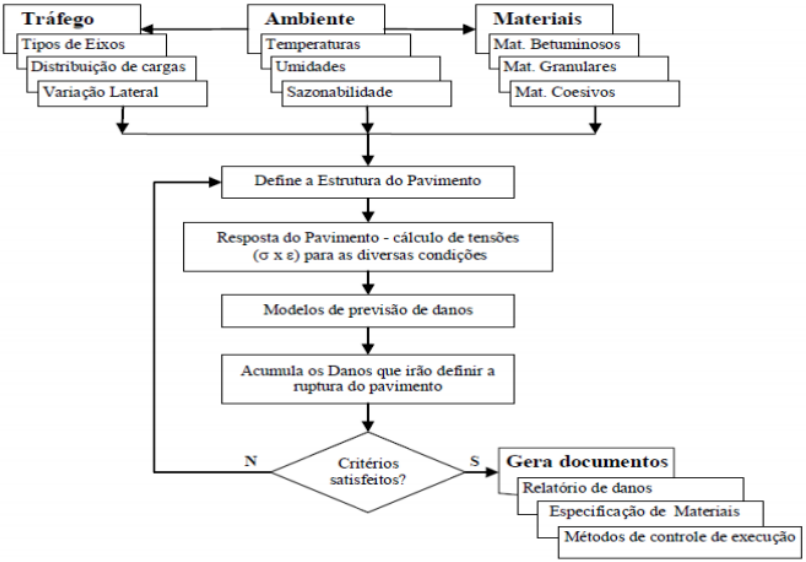
Figura 2.4 - Fluxograma para dimensionamento do pavimento



Fonte: Motta (1991).

Franco (2007), em sua tese de doutorado pela COPPE/RJ, desenvolveu um sistema computacional de dimensionamento de pavimentos, o SisPav. Nesse sistema buscou envolver todo o estado-da-arte atual referente ao projeto de estruturas de pavimentos asfálticos a fim de dimensionar mecanisticamente as espessuras das camadas com base nas informações detalhadas do tráfego, das condições ambientais e das características dos materiais. O fluxograma das atividades desempenhadas pelo programa estão mostradas na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Método de dimensionamento do SisPav



Fonte: Franco (2007).

O programa SisPav foi elaborado com base na teoria da elasticidade, por meio do programa Análise Elástica de Múltiplas Camadas - AEMC, do mesmo autor, desenvolvido também durante sua tese de doutorado, tendo como base o programa JULEA.

O programa mecanístico-empírico tem como objetivo realizar análises da vida útil de projeto de estruturas informadas ao programa, além de possibilitar o dimensionamento de pavimentos com base nos dados da estrutura, que realiza a análise por meio de algoritmos, calculando a espessura da camada necessária para atendimento aos requisitos de projeto (FONSECA, 2013).

O programa foi desenvolvido com base em ensaios de laboratório, materiais, clima e tráfego compatíveis com a realidade do país. O sistema contempla a seguintes características (FRANCO, 2007).

- Análise do tráfego para os diversos eixos com variação lateral;
- Variação sazonal do tráfego ao longo do período de projeto;
- Materiais com comportamento elástico linear e não linear, caracterizados e empregados nos segmentos monitorados;
- 21 modelos de previsão de danos desenvolvidos a partir da base de dados de resultados de ensaios brasileiros;

- Parâmetros dos materiais de pavimentação e bacias de deformação calculadas para controle de execução no campo e obtidas nos segmentos monitorados; e
- Análise de confiabilidade.

2.4.2 Considerações sobre a influencia do clima no dimensionamento de avimentos

A ação do clima influencia negativamente no desempenho dos pavimentos. A combinação entre clima e tráfego são os principais agentes determinantes de um limite de vida útil para as estruturas. Todavia é o aspecto mais difícil de se quantificar no dimensionamento dos pavimentos (MOTTA, 1991).

A temperatura do ar atua na intemperização dos agregados e nas propriedades resilientes da mistura asfáltica. A pluviosidade influencia na deformablidade das camadas da estrutura, sobretudo, no subleito (FRANCO, 2007). A ação em conjunto desses fatores implica na perda da capacidade estrutural dos pavimentos.

No Brasil, o que mais preocupa são as altas temperaturas, predominantes na maior parte do ano. As baixas temperaturas, como são bem localizadas e concentradas em poucos meses do ano, não influenciam nas caracteristicas dos pavimentos. Para minimizar esse efeito é preciso que o ligante escolhido seja adaptado às condições ambientais da região, assim como o traço e a granulometria da mistura (MOTTA, 1991).

O conhecimento das condições climáticas da região onde serão construídos os pavimentos são indispensáveis para a o correto dimensionamento das estruturas, tendo em vista que essas características devem ser levadas em conta na especificação de ensaios dos materiais.

Os métodos de dimensionamentos propostos atualmente consideram a influência das condições de temperatura nas características de desempenho dos pavimentos a partir de modelos obtidos em estudos como os de Witzack (Equação 2.7). Esses modelos estimam a temperatura média mensal e o desvio padrão dessa temperatura a uma determinada profundidade do revestimento a partir da temperatura média mensal do ar, assumindo uma distribuição normal de temperaturas mensais no pavimento para uma determinada profundidade (FRANCO, 2007).

$$MMPT = MMAT\left(1+\frac{1}{z+4}\right) - \frac{34}{z+4} + 6 \quad (2.7)$$

onde:
MMPT: temperatura média mensal do pavimento na profundidade z em, ºF;
MMAT: temperatura média mensal do ar, em ºF;
Z: profundidade na camada asfáltica do pavimento onde se quer conhecer a temperatura, em polegadas.

2.4.3 Conheciemento do tráfego para dimensionamento dos pavimentos

Um dos fatores que implicam no dimensionamento dos pavimentos flexíveis é o trafego que solicitará determinada via durante o período de vida útil. O dano causado pela passagem de cada veículo é, usualmente, de pequena magnitude mas o efeito cumulativo deste dano é que determina a resistência à fadiga dos pavimentos.

Conforme Franco (2007), o efeito da solicitação provocada pelo tráfego nas estruturas de pavimentos é devido à ação de cada configuração de eixo, em função do seu peso bruto transmitido por roda do veículo nas superfícies do pavimento. Assume-se que a pressão de contato do pneu com o pavimento seja igual a pressão de inflação dos pneus sendo possível calcular a área de contato a partir da divisão entre a carga de cada roda, pela pressão de inflação.

Atualmente os estudos para o dimensionamento do tráfego real da rodovia contemplam contagem de veículos e pesquisa de ocupação de carga, não sendo feitas as pesagens. Com esses dados, basicamente, faz-se uma projeção de crescimento de tráfego e estima-se os fatores de veículo e o tráfego futuro. No entanto, este critério não é o mais indicado e sim a concepção de mecanismos que considerem o efeito individual de todos os eixos que irão solicitar o pavimento (FONSECA, 2013).

3 MÉTODO DA PESQUISA E MATERIAIS UTILIZADOS

Para atingir os objetivos propostos, a pesquisa foi conduzida em 8 etapas, conforme descritas a seguir.

Etapa 1 - Informações Gerais da Estrutura do Pavimento: Essa etapa apresentou a concepção estrutural do pavimento nos segmentos monitorados.

Etapa 2 - Atualização do Tráfego: Essa etapa contemplou a atualização do número N (número equivalente de operações do eixo padrão de 8,2 tf) necessário à avaliação estrutural dos segmentos monitorados. Foi feita baseando-se no estudo de tráfego constante no projeto de duplicação e restauração da rodovia BR-101 para o trecho onde estão inseridos os segmentos.

Etapa 3 - Caracterização dos Materiais na Fase de Projeto: O objetivo dessa etapa foi o de realizar a caracterização dos materiais envolvidos na construção dos segmentos monitorados.

Etapa 4 - Projeto da Mistura Asfáltica: Nessa etapa foram apresentadas as metodologias de dosagem para os dois tipos de misturas utilizadas no estudo. Foi apresentada a dosagem da mistura asfáltica de projeto elaborada pelo CENPES/Petrobras (ligante convencional), bem como a dosagem da mistura asfáltica elaborada durante a fase de execução (asfalto-borracha).

Etapa 5 - Acompanhamento da Execução dos Segmentos Monitorados: Nessa etapa foi acompanhada a execução e a realização do controle tecnológico dos pavimentos.

Etapa 6 - Caracterização da Mistura Asfáltica: O objetivo dessa etapa foi o de apresentar a caracterização da mistura realizada na fase de projeto (CENPES/Petrobras), na fase de execução, a partir da coleta de amostras para moldagem de corpos de prova em laboratório e através da extração de amostras dos segmentos e na fase de pós-execução, a partir da moldagem de placas em laboratório.

Etapa 7 - Avaliação Estrutural e Funcional dos Segmentos Monitorados: Essa etapa contemplou a avaliação das características funcionais e estruturais no ano de abertura ao tráfego da rodovia. Para

isso foram feitos levantamentos de irregularidade longitudinal, afundamento de trilha de rodas, atrito, levantamento de defeitos e levantamento das deflexões.

Etapa 8 - Estimativa de Vida Útil: Essa etapa contemplou a estimativa de vida útil utilizando os valores de módulo resiliente obtidos por retroanálise e os valores obtidos em laboratório. Para a estimativa de vida útil foi utilizado o programa Elsym5.

3.1 ETAPA 1 – INFORMAÇÕES GERAIS DA ESTRUTURA DO PAVIMENTO

O dimensionamento do pavimento, realizado na época do projeto da rodovia pelo DNIT, foi feito utilizando-se o método da resiliência contemplado na publicação intitulada "A Consideração da Resiliência no Projeto de Pavimentos" - TECNAPAV dos engenheiros Salomão Pinto e Ernesto Preussler de 1994. Os dados de entrada, provenientes dos estudos do subleito e de tráfego, foram os seguintes: ISC=11%, solo tipo I e N = $1{,}13 \times 10^8$ (USACE) para o ano de 2003.

O dimensionamento estrutural do pavimento encontra-se detalhado no Anexo A, no qual resultou em uma camada granular de 38 cm, sendo 20 cm de sub-base, 18 cm de base e uma camada de revestimento de 15 cm.

A estrutura do pavimento nos segmentos monitorados, com relação às camadas granulares, seguiu a mesma concepção do projeto, mantendo-se a mesma espessura e tipo de materiais. Entretanto, nos segmentos 02 e 03 a camada de revestimento teve um acréscimo de 3 cm em sua espessura final, passando de 15 cm, originalmente projetada, para 18 cm. Esse acréscimo na espessura da camada asfáltica foi em virtude da necessidade de extração de corpos de prova para a realização de ensaios de desempenho da mistura asfáltica.

Ressalta-se que não houve qualquer interferência por parte da Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, no dimensionamento dos segmentos monitorados e tampouco no processo executivo e controle de qualidade para aceitação dos serviços executados, pois o objetivo desses segmentos é que o seu desempenho retratasse o estado da arte adotado pelo DNIT, tanto no dimensionamento quanto na execução das rodovias federais.

A Figura 3.1 ilustra o esquema do pavimento dimensionado para a rodovia e o Quadro 3.1 mostra os tipos de materiais empregados.

Figura 3.1 - Esquema das camadas do pavimento

Fonte: Autora (2016).

Quadro 3.1 - Materiais constituintes da estrutura dos pavimentos

Estrutura	Materiais	Espessura (cm)
Segmentos 01, 04 e 05	CAUQ	15
	BG	18
	MS	20
	Areia	mín 60
Segmento 02	CAUQ	18
	BG	18
	MS	20
	Areia	mín 60
Segmento 03	CAUQ (CAP 50/70)	12
	CAUQ (EXOFLEX B)	6
	BG	18
	MS	20
	Areia	mín 60

Fonte: Autora (2016).

3.2 ETAPA 2 – ATUALIZAÇÃO DO TRÁFEGO

Os dados apresentados a seguir, sobre a estimativa do tráfego, foram obtidos do projeto de duplicação da Rodovia BR-101 para o trecho do estudo (lote 29).

Na elaboração do projeto foram realizadas contagens volumétricas e classificatórias em períodos de 24 horas diárias por três dias consecutivos e também contagens horárias, onde obteve-se o tráfego para o ano de 1998. Com base no tráfego do ano base, foi projetado o tráfego para o período de projeto de 10 anos (2003 – 2012), considerando-se uma taxa de crescimento anual de 3,8 %. Para o cálculo

do volume médio diário anual e no número de operações do eixo padrão 8,2 tf, foram utilizadas as Equações 3.1 e 3.2.

$$VMDA_n = VMDA_0 (1 + i)^n \quad (3.1)$$

onde,
$VMDA_n$ = Volume de tráfego no ano "n";
$VMDA_0$ = Volume de tráfego no ano
N_i = número de operações do eixo padrão base;
I = Taxa de crescimento geométrico anual;
n = Número de anos para o período de projeto;

$$N_i = 365xVDMA_i \text{ x } FV.FR.FD \quad (3.2)$$

de 8,2 t para o ano "i";
365 = número de dias do ano;
VMDAi = volume médio diário anual na rodovia (ônibus + caminhões) no ano "i";
FD = fator direcional (32% para CP e 45 % para veículos comerciais).
FR = fator climático regional (adotado = 1,0); e
FV = fator de veículo ponderado, sendo calculado com base na composição da frota apresentada no Quadro 3.2. Foram obtidos FV_{AASTHO} = 1,61 e FV_{USACE} = 8,10.

Quadro 3.2 - Fatores de veículo individuais

	AASTHO		USACE	
VEÍCULO	PERCENTUAL %	FATOR DE VEÍCULO	PERCENTUAL %	FATOR DE VEÍCULO
Caminhão simples (2C)	13,1	0,12	13,1	0,12
Ônibus (2C)	8,2	0,28	8,2	0,3
Caminhão duplo (3C)	41,4	1,3	41,4	6,29
Reboque e semi-reboque (2S3, 3S3, 2S2, 3S2, 2C2, e 2S1)	37,3	2,85	37,3	15,1

Fonte: BRASIL (2001).

O tráfego estimado para o período de projeto foi de N= $1,13x10^8$, para a metodologia USACE e N= $2,25x10^7$ para a metodologia da AASTHO.

As informações sobre o estudo de tráfego do projeto encontra-se no Anexo B.

Como a abertura do tráfego na região dos segmentos monitorados se deu no ano de 2014, foi feita, neste trabalho, a atualização dos dados, que levou em consideração o mesmo período de projeto utilizado

anteriormente, ou seja, 10 anos, e a mesma taxa de crescimento geométrico de 3,8%.

A atualização do tráfego foi feita com o intuito de possibilitar um comparativo entre o tráfego previsto e a estimativa da vida útil dos segmentos monitorados no ano de abertura ao tráfego.

3.3 ETAPA 3 – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS NA FASE DE PROJETO

No caso específico da região onde se inserem os segmentos monitorados, os materiais de aterro e camada final foram provenientes de três jazidas e apresentaram características bem semelhantes. A caracterização dos materiais envolveu ensaios de compactação (DNER-129/94), granulometria (DNER-ME 080/94) e Índice de Suporte Califórnia (DNER-ME 049/94).

Os agregados minerais utilizados foram provenientes de uma pedreira localizada no município de Sombrio (km 436,5), distante aproximadamente 3 km a oeste da rodovia. Os estudos para avaliar a qualidade dos materiais englobaram ensaios de índice de forma (ABNT NBR 6954/89), abrasão Los Angeles (DNER-ME 035/98), durabilidade (DNER-ME 089/94), adesividade (DNER-ME 078/94), além de classificação petrográfica.

3.4 ETAPA 4 – PROJETO DA MISTURA ASFÁLTICA

Na construção dos segmentos monitorados foram utilizados dois tipos de mistura asfáltica: o concreto asfáltico usinado a quente com ligante convencional (CAP 50/70) e concreto asfáltico usinado a quente com asfalto-borracha (ECOFLEX B).

3.4.1 Dosagem da mistura asfáltica convencional

A dosagem da mistura asfáltica com ligante convencional foi elaborada pelo Centro de Estudos e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello – CENPES/Petrobras.

Na elaboração do traço da mistura asfáltica foi utilizado o compactador giratório, empregando-se os parâmetros da metodologia Superpave. A granulometria escolhida foi a faixa B do DNIT, com tamanho máximo do agregado de 19 mm. Os parâmetros de dosagem utilizados foram os relativos às condições de tráfego de médio a alto, ou seja, $N_{incial} = 8$, $N_{projeto} = 100$, $N_{máximo} = 160$ giros.

3.4.2 Dosagem da mistura com asfalto-borracha

A dosagem utilizou a mesma faixa granulométrica empregada para a mistura com ligante convencional, porém a percentagem de ligante e os parâmetros volumétricos foram determinados através da metodologia Marshall. Esta mistura foi utilizada apenas na primeira camada do segmento monitorado 3 (segmento em que se empregou o conceito de camadas integradas).

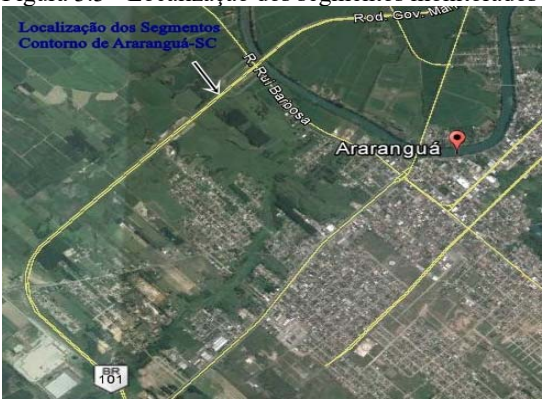
3.5 ETAPA 5 – ACOMPANHAMENTO DA EXECUÇÃO DOS SEGMENTOS MONITORADOS

Esta etapa do trabalho contemplou todos os procedimentos realizados para a obtenção dos parâmetros de controle da qualidade dos segmentos monitorados. As etapas construtivas foram acompanhadas desde a execução das camadas finais de terraplenagem à execução do revestimento asfáltico. A Figura 3.2 mostra a localização da cidade de Araranguá/SC e a Figura 3.3, a localização dos segmentos monitorados baseado em imagens do *Google Earth.*

Figura 3.2 - Localização de Araranguá em Santa Catarina

Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Araranguá

Figura 3.3 - Localização dos segmentos monitorados



Fonte: *Google Earth* (2016).

Os segmentos monitorados foram executados entre outubro a dezembro de 2012 e março de 2013. A abertura ao tráfego ocorreu apenas em março de 2014. A seguir são descritas as características de cada segmento monitorado.

3.5.1 Segmento monitorado 01

O segmento monitorado 01 está compreendido entre o km 411+790 e o km 412+090 (estaca 0+360 e 0+660), na pista sentido norte/sul da rodovia. Este segmento foi definido como sendo o segmento de referência (para a pista norte/sul) e apresenta estrutura idêntica à do restante da rodovia.

O pavimento foi construído sobre um subleito (60 cm finais de aterro) de areia de paleo duna (conforme estudo geológico constante no projeto da rodovia), onde as duas primeiras camadas de 20 cm foram compactadas com energia de 100% do Proctor normal e os 20 cm finais, compactados com energia de 100% do Proctor intermediário.

A camada granular totalizou 38 cm de espessura, sendo 20 cm de sub-base, executada com macadame seco e 18 cm de base de brita graduada. O revestimento possui 15 cm de espessura, dividido em 3 camadas de 5 cm cada. O material utilizado foi o concreto asfáltico usinado a quente com ligante CAP 50/70 (revestimento em camada singular). A Figura 3.4 apresenta as etapas da execução do segmento monitorado 01.

Figura 3.4 - Etapas da execução do segmento monitorado 01: a) terraplenagem; b) sub-base; c) base; e d) revestimento

Fonte: Autora (2012).

3.5.2 Segmento monitorado 02

Esse segmento situa-se entre os km 412+090 ao km 412+390 (estaca 0+660 a 0+960), sentido norte/sul da rodovia.

A estrutura e os materiais utilizados no subleito e nas camadas granulares desse segmento possuem as mesmas características utilizadas no segmento de referência (segmento 01). No entanto, a camada de revestimento possui maior espessura, nesse caso, 18 cm de concreto asfáltico usinado a quente, executado em 3 camadas de 6 cm. O ligante utilizado também foi o CAP 50/70. A Figura 3.5 mostra as etapas construtivas relativas ao segmento monitorado 02.

Figura 3.5 - Etapas da execução do segmento monitorado 02: a) terraplenagem; b) sub-base; c) base; e d) revestimento

Fonte: Autora (2012).

3.5.3 Segmento monitorado 03

Este segmento situa-se entre o km 412+090 ao km 412+390 (estaca 0+660 a 0+960), sentido sul/norte da rodovia.

Assim como nos demais segmentos, a estrutura e os materiais utilizados na construção do subleito e camadas granulares não sofreram alterações com relação ao restante da rodovia. Contudo, a camada de revestimento, além de ser construída com espessura de 18 cm, teve a primeira camada de 6 cm executada com asfalto-borracha (asfalto-borracha). Nas outras duas camadas, utilizou-se a mesma mistura do restante da rodovia. A Figura 3.6 mostra as etapas construtivas relativas ao segmento monitorado 03.

Figura 3.6 - Etapas da execução do segmento monitorado 03: a) terraplenagem; b) sub-base; c) base; e d) revestimento

Fonte: Autora (2012).

3.5.4 Segmentos monitorados 04 e 05

O segmento 04 situa-se entre o km 411+790 a 412+090 (estaca 0+360 a 0+660), sentido sul/norte da rodovia e o segmento 05 localiza-se entre o km 413+000 ao km 413+300 (estaca 1+570 a 1+870).

Esses segmentos, assim como o segmento 01, possuem concepção de pavimento idêntica à rodovia. Por esta razão, servem de referência aos demais segmentos. A opção por três segmentos, neste sentido da rodovia, está relacionada à necessidade de se ter referências nos dois sentidos do tráfego.

Para todos os segmentos a verificação da qualidade dos serviços foi realizada através do controle dos materiais utilizados durante a construção dos trechos de estudo e em atendimento às especificações vigentes. Os serviços referentes à execução de todas as etapas da pavimentação assim como da camada final de terraplenagem foram controlados através dos seguintes ensaios:

- Camada final de terraplenagem: Índice de suporte Califórnia (DNER-ME 049/94), massa específica aparente “in situ” com

frasco de areia (DNER-ME 092/94) e determinação da umidade com emprego do Speedy (DNER-ME 052/94);

- Camada de sub-base: análise granulométrica (DNER-ME 083/98), verificação expedita das condições de compactação e verificação do preenchimento dos vazios pelo agregado fino através da abertura de poços de inspeção, conforme preconizado na norma DEINFRA-SC ES-P 03/92.

- Camada de base: Índice de suporte Califórnia (DNER-ME 049/94), SC, análise granulométrica (DNER-ME 083/98), massa específica aparente "in situ" com frasco de areia, (DNER-ME 092/94), determinação da umidade pelo "método expedito da frigideira" e ensaio de equivalente de areia (DNER-ME 054/97);

- Revestimento: a camada de revestimento foi executada conforme orientações constantes na norma DNIT 031/2006-ES. Foram realizados ensaios de granulometria do material (DNER-ME 083/98), equivalente de areia (DNER-ME 054/97), teor de ligante na mistura (DNER ME 053/94) e ensaio Marshall (DNER-ME 043/95). Também foram feitos controle de temperatura da mistura e extração de corpos de prova com sonda rotativa para determinação do grau de compactação e espessura da camada.

Em todas as camadas do pavimento foi realizado o levantamento das deflexões com o equipamento Viga Benkelman conforme preconizado na norma DNER-ME 024/94. A deflexão admissível para todas as camadas do pavimento foi estimada em projeto através do programa Everstress 5.0, onde foram obtidos os valores conforme mostrados no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Deflexões admissíveis sobre as camadas do pavimento

Camada	Módulo de Elasticidade (MPa)	Deflexão ($x10^{-2}$ mm)
Revestimento camada final	3500	40,5
Revestimento camada 2	3500	46,8
Revestimento camada 1	3500	55,1
Base	300	64,3
Sub-base	250	85,2
Regularização do Subleito	90	115,4

Fonte: BRASIL (2001).

3.6 ETAPA 6 – CARACTERIZAÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA

3.6.1 Caracterização da mistura asfáltica na fase de projeto

A mistura asfáltica com ligante convencional foi caracterizada na fase de projeto através de ensaios de módulo dinâmico, CDI, *flow number* e deformação permanente.

Não foram feitos ensaios de resistência a fadiga. A mistura foi projetada para que tivesse bom comportamento quanto à deformação permanente, tendo em conta o insucesso de outras granulometrias quanto à deformação aplicadas na mesma rodovia. Esses ensaios foram realizados pelo Cenpes/Petrobras, por solicitação do DNIT.

3.6.2 Caracterização da mistura asfáltica na fase de execução

Durante a construção dos segmentos foram moldados corpos de prova Marshall em laboratório e também foram extraídos corpos de prova com sonda rotativa e em placas retangulares.

Os corpos de prova moldados em laboratório e extraídos na pista (Figura 3.7) foram utilizados nos ensaios para a determinação da resistência a tração, módulo resiliente e de dano por umidade induzida

As placas retangulares (Figura 3.8) foram utilizadas para a caracterização da mistura asfáltica através dos ensaios de módulo complexo, resistência à fadiga e resistência a deformação permanente.

Na fase de execução, todos os ensaios foram realizados pela UFSC.

Figura 3.7 - Corpos de prova moldados em laboratório (esq.) e extraídos da pista durante a execução dos segmentos (dir.)

Fonte: Autora (2012).

Figura 3.8 - Extração de placas dos segmentos

Fonte: Autora (2012).

As placas extraídas foram cortadas no bordo da faixa de rolamento, distante 35,0 cm a partir da quebra de bordo feito pelo rolo compactador. Para impedir a aderência das camadas de concreto asfáltico fez-se a proteção com papelão e areia para que o local da extração da placa não recebesse pintura de ligação, uma vez que foram extraídas placas em todas as camadas. Durante a extração tomou-se o máximo de cuidado para não provocar fissuras nas placas.

Todos os ensaios com os corpos de prova moldados durante a fase de execução dos segmentos, bem como, com as placas extraídas logo após a execução foram ensaiados apenas após dois anos da execução dos segmentos. A justificativa para isso é de que na época da execução dos segmentos nem todos os equipamentos de ensaios necessários estavam em operação no Laboratório de Pavimentação da UFSC.

3.6.3 Caracterização da mistura asfáltica pós-execução

Durante a etapa de execução foram coletadas e estocadas amostras de todos os materiais utilizados na camada asfáltica dos segmentos. Esses materiais foram utilizados para a confecção de placas para os ensaios de módulo complexo, resistência à fadiga e deformação permanente.

Para a moldagem das placas foi utilizada a mesa compactadora LCPC desenvolvida na França pelo *Laboratoire Central des Ponts e Chaussées*. A compactação das placas seguiu os aspectos da especificação francesa AFNOR NF P 98-250-2 - *Essais Relatifs Aux Chaussées, Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques.*

A norma francesa especifica para rodovias de tráfego pesado a compactação forte “tipo 2 bis” para placas de 600 x 400 x 90 mm (módulo e fadiga) e compactação forte “tipo 2” para placas de concreto asfáltico de 500 x 180 x 50 mm (deformação permanente). A Figura 3.9 mostra a compactação de uma placa para o ensaio de módulo complexo e fadiga, os corpos de prova prismáticos obtidos após a serragem e as placas para ensaio de deformação permanente.

Figura 3.9 - Moldagem de placas e corpos de prova para os ensaios de módulo complexo e fadiga (acima) e placas para o ensaio de deformação permanente (abaixo)

Fonte: Melo (2014).

3.6.4 Metodologia dos ensaios realizados

3.6.4.1 Ensaios de módulo resiliente e resistência à tração

A determinação do módulo resiliente foi realizada através da metodologia constante na norma DNIT 135/2010, com as seguintes condições:

- Frequência do carregamento: 1 Hz;
- Tempo total de duração do pulso (ciclo) de carga: 0,1s, com 0,9s de repouso;
- Temperatura de ensaio: 25°C ± 0,5°C;
- Carga aplicada: De 0,10 a 0,20 da resistência à tração por compressão diametral da mistura;

- Módulo foi obtido entre 100 e 300 aplicações do carregamento cíclico; e
- Coeficiente de Poisson: adotado da literatura especializada e recomendado pela norma.

Para a avaliação da resistência à tração foi utilizado o ensaio de resistência a tração por compressão diametral conforme a norma DNIT 136/2010. Esses ensaios foram realizados no laboratório da UFSC e constam no relatório de acompanhamento dos segmentos monitorados enviado à Petrobrás, de responsabilidade da Universidade conveniada.

3.6.4.2 Ensaio de dano por umidade induzida

A avaliação da suscetibilidade a água das misturas asfálticas foi feita através do ensaio de dano por umidade induzida através da metodologia ABNT NBR 15617/2008. Foram utilizados corpos de prova extraídos da pista e também corpos de prova moldados em laboratório (com 7% de vazios).

Nesse ensaio os corpos de prova (CPs) são submetidos a condições de saturação com água, congelamento e aquecimento. Os valores de resistência à tração (RT) desses CPs são comparados aos valores de RT de CPs que não sofreram o condicionamento. A razão entre os resultados dos CPs com e sem condicionamento (em percentagem) indica a suscetibilidade a água das misturas asfálticas. Os corpos de prova foram moldados com 7% de volume de vazios.

3.6.4.3 Ensaio de módulo complexo e fadiga

Para a avaliação do comportamento reológico das misturas foi realizado o ensaio de módulo complexo, seguindo as diretrizes da norma europeia EN 12697-26 – *Bituminous Mixtures, Test Methods For Hot Mix Asphalt – Part 26 Stiffness*.

O ensaio de resistência à fadiga foi realizado através da norma europeia EN 12697-26 – *Bituminous Mixtures, Test Methods For Hot Mix Asphalt – Part 24: Resistance to Fatigue*. Os ensaios para a obtenção do comportamento à fadiga foram conduzidos com as seguintes condições:

- Ensaios conduzidos sob carregamento sinusoidal contínuo e deformação controlada;

- Critério de ruptura sendo a redução de 50% do módulo complexo inicial, com módulo inicial determinado no centésimo ciclo;
- Temperatura do ensaio definida com base no comportamento reológico das misturas de concreto asfáltico, segundo o plano complexo (Cole-Cole), em termos de maior dissipação de energia; e
- Frequência de teste de 10 Hz, equivalente a velocidade de 72 km/h (CHABOT et al., 2009, apud MELO 2014).

O equipamento mostrado na Figura 3.10 e utilizado no ensaio de módulo complexo e resistência à fadiga é fabricado pela empresa IPC Global®. Possui a designação de *Pneumatic 4 Point Bending Apparatus* ou fadiga a 4 pontos. O equipamento funciona através da aplicação de duas cargas senoidais posicionadas verticalmente a um terço do vão dos corpos de prova prismáticos (vigas).

Figura 3.10 - Aparato de teste 4 pontos

Fonte: Melo (2014).

3.6.4.4 Ensaio de deformação permanente

Para a avaliação do desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação empregou-se o simulador de tráfego francês *Orniéreur*. Este procedimento seguiu a norma francesa AFNOR NF P 98-253-1 - *Essais Relatifs Aux Chaussées, Déformation Permanentedes Mélanges Hydrocarbonés*. As placas foram ensaiadas a temperatura de 60°C, para acelerar o processo, a pressão de inflação dos pneus foi de 0,6 MPa e a carga de 5 kN.

Na Figura 3.11 é apresentado o equipamento utilizado para a avaliação das misturas de concreto asfáltico quanto ao desempenho à

deformação permanente. O equipamento testa duas placas simultaneamente com a passagem de um eixo simples de roda simples.

Figura 3.11 - Simulador de tráfego francês *Orniéreur*

Fonte: Melo (2014).

3.7 ETAPA 7 – AVALIAÇÃO ESTRUTURAL E FUNCIONAL DOS SEGMENTOS MONITORADOS

3.7.1 Avaliação Estrutural

A avaliação estrutural foi realizada para se conhecer as características das várias camadas que compõem o pavimento, quanto à sua resistência e deformabilidade sob a ação do tráfego, que são função das propriedades dos materiais e das espessuras das camadas.

A avaliação estrutural dos segmentos monitorados foi feita baseando-se no método de análise das deflexões na estrutura. Para isso, foram utilizados os dados obtidos nos levantamentos deflectométricos feitos em três fases distintas:

- Fase I: Nessa fase, os levantamentos foram realizados na época da construção, entre outubro e dezembro de 2012. Esses levantamentos foram feitos utilizando o equipamento Viga Benkelman (segundo a norma DNIT 133/2010), conforme mostrado na Figura 3.12.

Figura 3.12 - Levantamento de bacias de deformação com a Viga Benkelman

Fonte: Autora (2012).

- Fase II: Nessa fase, os levantamentos foram realizados em novembro de 2013, ou seja, um ano após a execução dos segmentos monitorados (nessa época ainda não havia tráfego nos segmentos). Esses levantamentos foram feitos utilizando o equipamento Viga Benkelman (segundo a norma DNIT 133/2010), conforme mostrado na Figura 3.12.

- Fase III: Nessa fase, foram feitos novos levantamentos das deflexões e bacias de deformação, porém com a utilização *do Falling Weight Deflectometer (FWD)*. Esses levantamentos foram realizados dias antes da abertura ao tráfego, que se deu em março de 2014, e serviram como caracterização inicial dos segmentos monitorados, denominada aqui como caracterização no ano zero. Seguiu-se a norma DNIT-PRO 273/96. A Figura 3.13 mostra a execução do ensaio.

O equipamento da COPPETEC/RJ utilizado no estudo é de fabricação sueca, da marca KUAB, modelo 8833, onde a carga aplicada pode variar de 14 a 150 kN. A carga aplicada nos levantamentos foi de 40kN, equivalente ao semi-eixo padrão.

Para a obtenção dos parâmetros de módulo resiliente e coeficiente de Poisson dos materiais constituintes de cada estrutura foi efetuada a retroanálise das bacias de deformação.

Figura 3.13 - FWD utilizado nos levantamentos

Fonte: COPPETEC (2014).

Para as deflexões obtidas com a Viga Benkelman (Fase I e II) a retroanálise foi efetuada através do programa Elsym5 enquanto que para as deflexões medidas com o FWD (Fase III), foi utilizado o programa Bakfaa para a retroanálise e o programa Elsym5 para a análise das tensões e deformações atuantes na estrutura.

O programa Elsym5 foi desenvolvido na Universidade da Califórnia, em Berkeley. Possibilita o cálculo de estruturas flexíveis e semirrígidas de até cinco camadas superpostas. Permite o cálculo das tensões, deformações e deslocamentos para um sistema tridimensional de camadas elásticas (DAROUS, 2003). As informações necessárias para as análises no programa são:

- Quantidade, valor e coordenadas (x,y) das cargas atuantes;
- Pressão de inflação dos pneus;
- Número de camadas com seus respectivos módulos de deformabilidade e coeficiente de Poisson;
- Coordenadas dos pontos de análise em relação às cargas (x,y);
- Profundidade de interesse na análise (z).

O programa Bakfaa foi desenvolvido pela *Federal Aviation Administration* (FAA). Possibilita a retroanálise das bacias de deformação obtidas com o FWD.

Como dados de entrada no programa são necessários a carga utilizada no levantamento, o raio de roda, espessura e estimativa dos parâmetros de deformabilidade das camadas (módulo de resiliência e coeficiente de Poisson), além das bacias de deformação obtidas nos levantamentos.

3.7.2 Avaliação Funcional

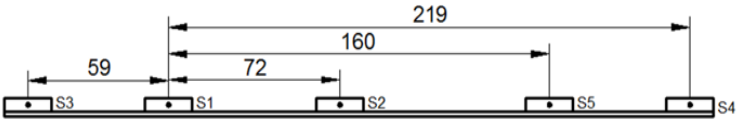
Para o conhecimento das condições funcionais dos pavimentos no ano zero foram efetuadas medições de irregularidade, atrito, textura e levantamento de defeitos.

3.7.2.1 Irregularidade longitudinal (IRI)

Nas medições de irregularidade nos segmentos monitorados foi utilizado o Perfilômetro à *laser* da COPPETEC/UFRJ. Esse equipamento foi desenvolvido no Brasil pela empresa Cibermétrica. O perfilômetro conta com 5 módulos de *laser* instalados em uma barra acoplada na parte frontal do veículo, esses módulos estão instalados na barra de forma a avaliar a irregularidade e o afundamento em ambas as trilhas de rodas.

O levantamento foi realizado nas trilhas de rodas interna e externa, em ambas as faixas de tráfego. A Figura 3.14 mostra a configuração dos sensores do equipamento utilizado nas medições.

Figura 3.14 - Distância entre os sensores



Fonte: COPPETEC (2014).

Simultaneamente também foram feitos levantamentos de afundamentos na trilha de rodas (ATR).

A Figura 3.15 mostra o Perfilômetro à *Laser* da COPPETEC instalado no veículo.

Figura 3.15 - Medições com o Perfilômetro à *laser*

Fonte: Autora (2014).

3.7.2.2 Medições de atrito e textura superficial dos pavimentos

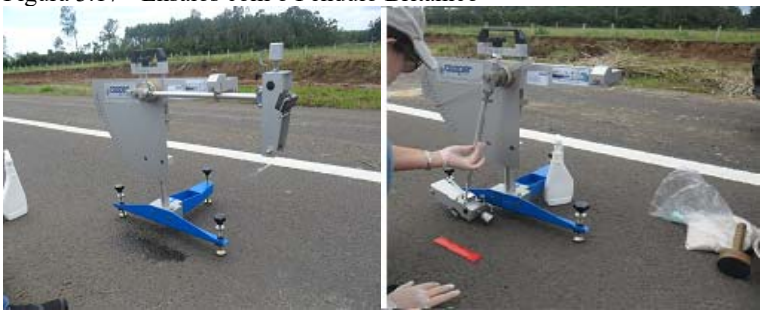
As medições de atrito (microtextura) dos revestimentos foram realizadas através de ensaios utilizando os equipamentos *Grip Tester*, com o procedimento remecomendado pela ASTM E 1844 (*Standard Specification for A Size 10 4-5 Smooth – Tread Friction Test Tire)* e com o Pêndulo Britânico pela norma ASTM E 303 – *Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*. A Figura 3.16 mostra o equipamento utilizado nos levantamentos dos segmentos monitorados.

Figura 3.16 - Medição do atrito com *Grip Tester*

Fonte: Autora (2014).

A avaliação da microtextura da superfície dos pavimentos também foi realizada com o Pêndulo Britânico. A medição do atrito no local foi realizada através de 4 leituras do ponteiro de arrasto. As estações de ensaio localizaram-se nas trilhas de rodas externas da faixa direita, em todos os segmentos. A Figura 3.17 mostra a execução do ensaio nos segmentos.

Figura 3.17 - Ensaios com o Pêndulo Britânico



Fonte: Autora (2014).

A medição da textura (macrotextura) foi realizada pelo método da Macha de Areia (ASTM E 965 – *Measuring Pavement Macrotexture Depht a Volumetric Technique*).

Figura 3.18 - Ensaio de Mancha de Areia

Fonte: Autora (2014).

3.8 ETAPA 8 – ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DOS SEGMENTOS MONITORADOS

3.8.1 Estimativa de Vida Útil dos Segmentos Monitorados

Como base nos resultados estimados dos parâmetros de deformabilidade dos materiais constituintes do pavimento, no ano de abertura ao tráfego (fase III) foi feita a análise estrutural a fim de obter as tensões e deformações atuantes em cada estrutura.

Os resultados obtidos permitiram uma estimativa de vida útil para os pavimentos, onde as tensões atuantes na estrutura foram obtidas através do programa Elsym5, considerando um semi-eixo simples de

roda dupla (ESRD), com carga de 4100kgf (referente a um eixo padrão de 8.200kgf), com pressão de inflação dos pneus de 5,6 kgf/cm².

Para a estimativa de vida útil dos segmentos monitorados foi utilizado como critério de ruptura a deformação de tração na fibra inferior da camada de revestimento (εt).

Os modelos de comportamento a fadiga das misturas foram aqueles determinados na etapa 3.6.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 ATUALIZAÇÃO DO TRÁFEGO

A atualização do tráfego na rodovia para o ano de abertura (2014) foi feita baseada nos dados do estudo de tráfego constante no projeto da rodovia. Com isso, foram utilizados os mesmos critérios adotados à época com relação a taxa de crescimento do tráfego, de 3,8% e o período de projeto, de 10 anos.

O volume médio diário anual (VMDA) estimado para o ano de 2012 foi de 24.149. Aplicando-se a mesma taxa de crescimento estimada, tem-se para o ano de abertura (2014) um VDMA de 26.019. O N acumulado para o 10º ano é de $1{,}67 \times 10^8$ (USACE) e $3{,}32 \times 10^7$ (AASTHO), conforme demonstrado nos Quadros 4.1 e 4.2.

Quadro 4.1 - Número N - USACE

Ano	Autom.	Ônibus	Caminhões			Total	N	
			Médio	Pesado	Semi-reboque		Parcial	Acumulado
2014	15.460	871	1.388	4.366	3.934	26.019	1,40E+07	1,40E+07
2015	16.048	904	1.441	4.532	4.083	27.008	1,46E+07	2,86E+07
2016	16.658	938	1.496	4.705	4.238	28.034	1,51E+07	4,38E+07
2017	17.291	974	1.552	4.883	4.400	29.099	1,57E+07	5,95E+07
2018	17.948	1.011	1.611	5.069	4.567	30.205	1,63E+07	7,58E+07
2019	18.630	1.049	1.673	5.261	4.740	31.353	1,69E+07	9,27E+07
2020	19.338	1.089	1.736	5.461	4.920	32.544	1,76E+07	1,10E+08
2021	20.072	1.130	1.802	5.669	5.107	33.781	1,82E+07	1,29E+08
2022	20.835	1.173	1.871	5.884	5.301	35.064	1,89E+07	1,47E+08
2023	21.627	1.218	1.942	6.108	5.503	36.397	1,97E+07	**1,67E+08**

Fonte: Adaptado de BRASIL (2001).

Quadro 4.2 - Número N – AASHTO

Ano	Autom.	Ônibus	Caminhões			Total	N	
			Médio	Pesado	Semi-reboque		Parcial	Acumulado
2014	15.460	871	1.388	4.366	3.934	26.019	2,79E+06	2,79E+06
2015	16.048	904	1.441	4.532	4.083	27.008	2,90E+06	5,69E+06
2016	16.658	938	1.496	4.705	4.238	28.034	3,01E+06	8,70E+06
2017	17.291	974	1.552	4.883	4.400	29.099	3,12E+06	1,18E+07
2018	17.948	1.011	1.611	5.069	4.567	30.205	3,24E+06	1,51E+07
2019	18.630	1.049	1.673	5.261	4.740	31.353	3,36E+06	1,84E+07
2020	19.338	1.089	1.736	5.461	4.920	32.544	3,49E+06	2,19E+07
2021	20.072	1.130	1.802	5.669	5.107	33.781	3,63E+06	2,55E+07
2022	20.835	1.173	1.871	5.884	5.301	35.064	3,76E+06	2,93E+07
2023	21.627	1.218	1.942	6.108	5.503	36.397	3,91E+06	**3,32E+07**

Fonte: Adaptado de BRASIL (2001).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS NA FASE DE PROJETO

4.2.1 Solos

Conforme consta nos estudos geológicos do projeto de duplicação (BRASIL, 2001), a região por onde se estende o traçado da rodovia BR-101 entre os municípios de Araranguá e Sombrio é formada por sedimentos da planície costeira, que foram construídas durante o Cenozóico, mediante a acumulação de sedimentos de origem continental, transicional e marinha em paleo-reentrâncias da zona costeira. Os sedimentos mais antigos que ocorrem na região foram depositados no final do Paleozóico, com mais de 230 milhões de anos de idade. São atribuídos à Formação Rio do Rasto - Grupo Passa Dois.

Especificamente na região de inserção dos segmentos monitorados verificou-se a predominância de solos arenosos finos a muito finos interceptados por depósitos de sedimentos ricos em matéria orgânica decorrente da drenagem local. Essas areias são amplamente exploradas na forma de jazidas e utilizadas na região para a execução de aterros e na construção civil, e que, a partir dos ensaios de caracterização, se mostraram adequados ao uso nas obras de terraplenagem da rodovia. Esses solos podem ser classificados, com relação à pedologia, como areias quartzosas podzolizadas (BRASIL, 2001).

Os solos utilizados nas camadas de aterro e na camada final de terraplenagem dos segmentos monitorados foram provenientes das jazidas Edilson e Moacir, localizadas no km 413 (sentido sul/norte) e da jazida Osni, localizada no km 419,90, (sentido norte/sul). As Figuras 4.1 e 4.2 mostram os locais de origem dos materiais utilizados nas camadas de terraplenagem.

Figura 4.1 - Jazida Edilson (esq.) e jazida Moacir (dir.)

Fonte: Autora (2012).

Figura 4.2 - Jazida Osni

Fonte: Autora (2012).

Os materiais foram caracterizados no laboratório do Consórcio Supervisor da obra através dos ensaios de compactação, granulometria e ISC, conforme as normas citadas no item 3.3. Os resultados estão mostrados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 - Caracterização dos solos empregados nos segmentos

Jazida	I.S.C. (%)	Exp. (%)	Análise Granulométrica (%)						Class. TRB	γ máx. (kN/m³)	h ótima (%)
			19,1 mm (¾")	9,5 mm (3/8")	4,76 mm (N°4)	2,0 mm (N°10)	0,42 mm (N°40)	0,075 mm (N°200)			
Edilson	14	0	100	100	100	100	94,5	3,8	A-3	17,27	12,3
Osni/ Moacir	18	0	100	100	100	100	99,2	4,9	A-3	17,47	14,5

Fonte: Autora (2012).

Também foram coletadas amostras e levadas ao laboratório de pavimentação da UFSC para a realização de ensaios de módulo resiliente. No entanto, esse ensaio não pôde ser concluído devido à pouca ou inexistência de coesão do material.

Conforme Trichês (2014), por se tratar de uma areia quase pura, não plástica e muito uniforme, a falta de coesão dificultava a moldagem dos corpos de prova e o seu encamisamento. Dos corpos de prova que foram possíveis de se colocar na câmara triaxial, não foi possível passar pela fase de condicionamento. A cada aplicação do carregamento cíclico, o corpo de prova apresentava uma deformação excessiva e sofria um embarrigamento, indicando a fragilidade da estrutura granular conseguida com a compactação.

A Figura de 4.3 mostra a moldagem dos corpos de prova e um corpo de prova rompido no ensaio triaxial de carga repetida. Assim, não foi possível determinar o comportamento da areia em laboratório. A

estimativa do módulo resiliente desta camada foi feita através da retroanálise das bacias de deformação.

Figura 4.3 - Corpo de prova rompido na tentativa de encamisamento (acima) e corpo de prova que rompeu após o condicionamento (abaixo)

Fonte: Trichês (2014).

4.2.2 Agregados

Os agregados minerais utilizados na execução dos segmentos tiveram suas propriedades analisadas, durante a fase de projeto, a partir dos ensaios de forma, resistência a abrasão Los Angeles, durabilidade e adesividade ao ligante betuminoso. Esses ensaios foram realizados na fase de projeto pela UFSC, solicitados pelo DNIT.

Na caracterização quanto à forma foram ensaiadas duas amostras do agregado de 19,1 mm (3/4”) e duas amostras do agregado de 9,5 mm (3/8”), onde os resultados estão mostrados no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 - Avaliação quanto à forma

Características	Diâmetro do agregado			
	19,1 mm (3/4”)		9,5 mm (3/8”)	
	01	02	01	02
Cúbica, %	79,21	80,20	70,30	69,31
Alongada, %	5,94	4,95	6,93	4,95
Lamelar, %	14,85	14,85	22,77	24,75
Alongada – Lamelar, %	0,00	0,00	0,00	0,99

Fonte: Adaptado de DNIT (2011).

O ensaio indicou que os agregados possuem cubicidade satisfatória, sendo adequados para o uso em pavimentação.

No ensaio de resistência a abrasão Los Angeles os materiais apresentaram perda de massa de 10,5%, indicando resistência ao desgaste relativamente alta, tendo em vista que as especificações brasileiras limitam o valor da abrasão Los Angeles entre 40% e 55% para agregados utilizados em camadas de base e revestimento (BERNUCCI *et al*., 2009).

Quanto à durabilidade, os resultados mostraram valores médios de 4%, enquanto que o valor limite máximo especificado é de 12%.

A adesividade ao ligante betuminoso foi verificada a partir da avaliação visual do recobrimento dos agregados pelo ligante após imersão em água (DNER-ME 078/94). Os resultados obtidos foram satisfatórios.

4.2.3 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico convencional utilizado foi proveniente das refinarias Alberto Pasqualini - REFAP (Canoas/RS) e da refinaria Presidente Getúlio Vargas – REPAR (Araucária/PR).

Os Quadros 4.5 e 4.6 apresentam as características do ligante asfáltico convencional CAP 50/70 e do asfalto-borracha exigidas pela ANP (Agencia Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis).

A dosagem da mistura com asfalto-borracha foi realizada utilizando a mesma granulometria empregada para a mistura com ligante convencional.

As temperaturas de usinagem e compactação da mistura convencional foi obtida através do ensaio de viscosidade, onde obteve a curva viscosidade υ temperatura mostrada na Figura 4.4. As temperaturas definidas no ensaio estão mostradas no Quadro 4.5, bem

como as temperaturas de usinagem e compactação do asfalto-borracha fornecidas pelo fabricante.

Quadro 4.5 - Características do ligante convencional – CAP 50/70

Características	Método	Especificação	Resultado
Penetração (100g, 5s, 25ºC) (0,1 mm)	D5	50 a 70	59
Ponto de amolecimento (°C) mín.	D36	46	49
Viscosidade Saybolt-Furol			
a 135°C,s	E 102	141	195,5
a 150°C,s		50	99,4
a 177°C,s		30 a 150	38,4
Viscosidade Brookfield			
a 135°C, SP21, 20 rpm (cP)	D 4402	274	380
a 150°C, SP21 (cP)		112	189
a 177°C, SP21(cP)		57 a 285	71
Ponto de fulgor (°C)	D 92	235	326
Solubilidade em tricloroetileno (%)	D 2042	99,5	99,9
Ductilidade a 25°C (cm)	D 113	60	>100
Efeito do Calor e do Ar			
Variação em massa (%)	D 2872	0,5	-0,103
Ductilidade a 25°C (cm)	D 113	20	>100
Penetração retida (%)	D 5	55	69
Aumento do ponto de amolecimento (°C)	D 36	8	4,1

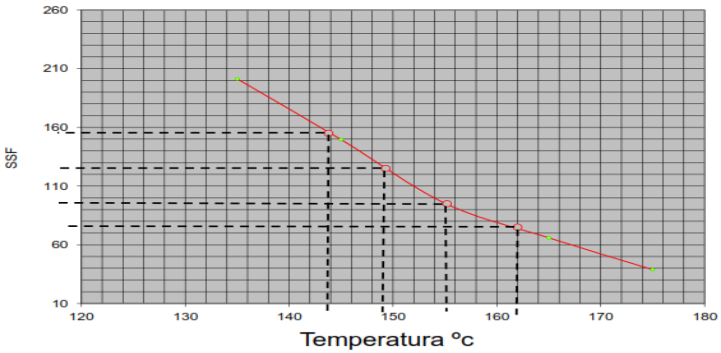
Fonte: ANP, 2005

Quadro 4.6 - Características do asfalto-borracha

Características	Método	Especificação	Resultado
Penetração (100g, 5s, 25ºC), (0,1 mm)	NBR 6576	30 - 70	50
Ponto de fulgor (°C)	NBR 11341	Mín 235	>240
Densidade relativa, 25°C	NBR 6296	-	1,02
Ponto de amolecimento (°C)	NBR 6560	Mín 55	60
Recuperação elástica (%)	NLT 329/91	Mín 50	78
Viscosidade Brookfield à 175°C, SP 3, 20 RPM (cP)	NBR 15529	800 - 2000	1520
Temp. de carregamento (°C)	-	170 - 185	175

Fonte: ANP, 2008.

Figura 4.4 - Gráfico de viscosidade υ temperatura do ligante convencional



Fonte: Adaptado de DNIT (2011).

Quadro 4.7 - Temperaturas de usinagem e compactação

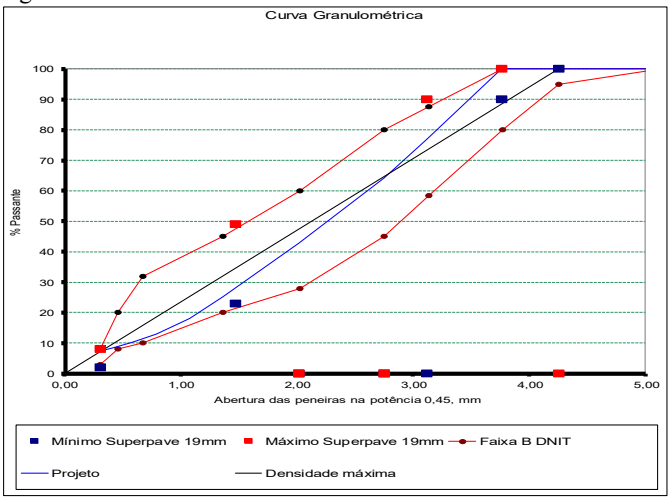
Temperatura	CAP 50/70	ECOFLEX B
Temperatura de usinagem do ligante (ºC)	155-162	170-177
Temperatura de compactação do ligante (ºC)	144-149	155-165

Fonte: Adaptado de DNIT (2011)

4.3 PROJETO DA MISTURA ASFÁLTICA

A dosagem utilizada para o concreto asfáltico usinado a quente com ligante convencional foi elaborada pelo CENPES/Petrobras empregando a metodologia Superpave. A elaboração da curva granulométrica seguiu os parâmetros dessa metodologia baseados nos critérios de pontos de controle e zona de restrição, conforme mostrados na Figura 4.5, que ilustra a curva granulométrica e os pontos de controle da especificação Superpave para o tamanho nominal máximo de 19 mm.

Figura 4.5 - Curva Granulométrica



Fonte: CENPES (2011).

Para a composição da mistura foram utilizados 43% de brita 3/4" (19,1 mm), 18,5% de brita 3/8" (9,1 mm), 37% de pó de pedra (4,75 mm), 1,5% de fíler. A granulometria da mistura está apresentada no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 - Granulometria da mistura

Peneira de malha quadrada		Mistura	Faixa de Trabalho	Faixa B (DNIT-031/2006-ES)
Série ASTM	Abertura (mm)			
1 1/2"	37,50	100,0	100	100
1"	25,00	100,0	100	95 - 100
3/4"	19,00	100,0	93 - 100	80 - 100
1/2"	12,50	78,5		
3/8"	9,50	65,5	57,3 -7 1,3	45 - 80
1/4"	6,30	51,7		
Nº4	4,75	42,3	37,9 - 47,9	28 - 60
Nº 8	2,36	26,8		
Nº 10	2,00	23,6	20,1 - 30,1	20 - 45
Nº 16	1,18	17,4		
Nº 30	0,60	13,0		
Nº 40	0,42	11,5	10 - 16,5	10 - 32
Nº 50	0,30	10,5		
Nº 80	0,180	9,2	8 - 14,2	8 - 20
Nº 100	0,150	8,6		
Nº 200	0,074	7,1	5,3 - 9,3	3 - 8

Fonte: CENPES (2011).

A mistura se enquadra na faixa B do DNIT. De acordo com o método utilizado, a denominação se relaciona com o tamanho nominal máximo do agregado, neste caso, Superpave 19 mm. Os parâmetros volumétricos da mistura estão mostrados no Quadro 4.9

Quadro 4.9 - Propriedades da mistura asfáltica com ligante convencional

Teor de ligante (%)	Vazios (%)	VAM (%)	RBV (%)	RFB[1] (%)	G_{mm}@N_{ini} (%)	G_{mm} (g/cm³)	MEA[2], (g/cm³)
4,15	4	13,2	69,7	2,3	84,8	2,705	2,597

Fonte: CENPES (2011).

A mistura asfáltica também foi caracterizada através dos ensaios de módulo dinâmico, CDI, *Flow Number* e deformação permanente. Os resultados estão mostrados na seção 4.5.1.

Para possibilitar o controle tecnológico durante a execução, a mistura foi reproduzida através do método Marshall, obtendo os seguintes parâmetros (Quadro 4.10).

Quadro 4.10 - Características da mistura asfáltica com ligante convencional

Características da mistura asfáltica	Superpave	Marshall
Massa específica teórica (DMT) (g/cm³)	2,705	2,714
Massa específica aparente (g/cm³)	2,597	2,600
Teor ótimo (%)	4,15	4,15
Vazios (%)	4,0	4,2
VAM (%)	13,2	14,0
RBV (%)	69,7	70,0
Fluência (1/100”)	-	13,2
Estabilidade (kgf)	-	1446

Fonte: Adaptado de DNIT (2011).

Para o concreto asfáltico modificado por borracha foi utilizada a mesma granulometria da mistura convencional. Porém elaborou-se a dosagem utilizando a metodologia Marshall. Os parâmetros obtidos estão mostrados no Quadro 4.11.

[1]A relação fíler betume (RFB) ficou acima do máximo recomendado (1,60), devido à grande quantidade de material passante na peneira 0,075 mm do pó de pedra (cerca de 16%).

[2]O valor de massa específica aparente foi determinado segundo método ASTM D 2726

Quadro 4.11 - Características da mistura com asfalto-borracha

Características da mistura asfáltica	Marshall
Massa específica teórica (DMT), g/cm³	2,662
Massa específica aparente, g/cm³	2,562
Teor ótimo, %	5,4
Vazios, %	3,8
VAM, %	17,6
RBV, %	78,0
Fluência, 1/100”	3,2
VCB, %	14,2
Estabilidade, kgf	1535

Fonte: Autora (2012).

4.4 ACOMPANHAMENTO DA EXECUÇÃO DOS SEGMENTOS MONITORADOS

Os segmentos monitorados foram executados em um trecho de implantação da rodovia, denominado Contorno de Araranguá. A definição do local se deu em virtude de não haver interferência com a drenagem da rodovia e por estar fora da área de ocorrência de solos moles.

4.4.1 Camada final de terraplenagem

A terraplenagem dos segmentos monitorados envolveu, basicamente, operações de aterro. A única exceção foi nas proximidades da estaca 0+770, em ambas as pistas, que houve um pequeno rebaixo para implantação da camada final.

A altura dos aterros foi em torno de 2 a 4 metros para o segmento 01 (esse segmento localiza-se numa região de elevação de greide para o encontro com a ponte sobre o rio Araranguá). Nos demais segmentos, a altura do aterro variou entre 0,60 a 2 metros.

A camada final de terraplenagem foi executada, conforme preconiza a norma DNIT 108/2009-ES, com espessura de 60 cm, executada em 3 camadas de 20 cm. O controle dos insumos foi efetuado através de ensaios de compactação, granulometria e ISC. Foi empregada a energia do ensaio normal de compactação (DNER-ME 129/94-método A) para as duas primeiras camadas e a energia do ensaio intermediário de compactação (DNER-ME 129/94-método B) para a última camada, conforme especificado no projeto. A Figura 4.6 mostra a sequência executiva das camadas de aterro.

Figura 4.6 - Execução de camada final de terraplenagem: a) espalhamento do material e b) compactação

Fonte: Autora (2014).

Para a verificação das condições de compactação e umidade ótima das camadas de aterros foram realizados os ensaios de massa específica aparente "in situ" (DNER-ME 092/94) e determinação da umidade com o emprego do Speedy (DNER-ME 052/94). Os resultados obtidos estão mostrados nos Quadros de 4.12 a 4.14.

Quadro 4.12 - Controle da camada final de terraplenagem. Segmento 01

Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)	Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)	Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)
1ª CAMADA				2ª CAMADA				3ª CAMADA			
0+360	17,48	12,6	100,6	0+380	17,33	12,2	100,3	0+380	17,32	11,8	101,4
0+440	17,32	11,2	100,4	0+480	17,11	12,4	100,4	0+480	17,27	11,6	101,1
0+540	17,30	13,4	100,3	0+580	17,20	11,0	100,9	0+580	17,22	11,2	100,8
0+640	17,03	9,8	100,2	0+640	17,01	13,0	100,1	0+640	17,18	13,0	101,1

Fonte: Autora (2014).

Quadro 4.13 - Controle da camada final de terraplenagem. Segmento 02

Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)	Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)	Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)
1ª CAMADA				2ª CAMADA				3ª CAMADA			
0+690	17,30	13,2	101,8	0+690	17,03	12,5	100,2	0+690	17,17	12,5	101,0
0+740	18,62	11,4	104,3	0+720	1,842	9,8	104,9	0+720	18,54	10,0	104,5
0+780	18,45	14,0	103,4	0+740	18,72	9,8	106,6	0+760	18,11	10,0	102,1
0+800	18,58	10,6	104,1	0+780	18,60	10,6	105,9	0+780	18,58	9,0	104,7
0+820	18,60	8,5	104,2	0+820	18,58	9,0	105,8	0+800	18,32	9,6	103,3
0+860	17,95	10,6	100,6	0+880	18,29	10,0	104,2	0+840	18,62	9,8	105,0
0+900	18,47	10,8	103,5	0+900	18,78	10,6	106,9	0+880	18,09	9,4	101,2
0+940	18,26	11,6	102,5	0+930	18,31	9,0	104,3	0+920	18,43	9,0	103,1
0+980	18,68	12,0	104,9	0+960	18,88	10,0	107,5	0+980	18,57	9,4	103,9

Fonte: Autora (2014).

Quadro 4.14 - Controle da camada final de terraplenagem. Segmento 03

Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)	Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)	Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)
1ª CAMADA				2ª CAMADA				3ª CAMADA			
0+640	17,10	11,7	100,2	0+640	17,13	12,0	100,3	0+640	17,18	13,0	100,6
0+690	17,19	12,0	100,7	0+690	17,39	12,2	101,9	0+690	17,17	12,5	100,6
0+720	18,54	9,8	104,6	0+720	17,86	10,2	102,9	0+770	18,30	9,4	101,6
0+760	18,51	11,0	104,4	0+760	18,08	10,6	104,2	0+800	18,49	10,6	102,7
0+800	18,54	10,0	104,6	0+800	18,18	10,8	104,8	0+830	18,42	10,8	102,3
0+840	17,97	10,8	101,4	0+840	18,15	10,2	104,6	0+860	18,28	10,0	101,5
0+870	18,05	11,2	101,8	0+880	18,11	10,0	104,4	0+890	18,71	10,0	103,9
0+890	18,44	11,0	104,0	0+900	18,16	8,6	104,7	0+920	18,17	9,2	100,9
0+920	18,30	10,0	103,2	0+920	18,17	10,0	104,7	0+950	18,35	11,4	101,9
0+980	18,41	8,0	103,8	0+980	17,95	10,2	101,4	0+980	18,40	11,0	102,2

Fonte: Autora (2014).

Quadro 4.15 - Controle da camada final de terraplenagem. Segmento 04

Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)	Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)	Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)
1ª CAMADA				2ª CAMADA				3ª CAMADA			
0+360	-	-	-	0+360	-	-	-	0+360	17,32	13,2	100,1%
0+380	17,46	13,2	100,5	0+380	17,52	12,2	101,4	0+380	17,32	12,0	101,3%
0+440	17,25	12,4	101,2	0+440	-	-	-	0+440	17,03	13,0	100,0%
0+480	-	-	-	0+480	17,37	11,4	100,0	0+480	17,35	13,2	101,0%
0+540	17,26	13,8	100,0	0+580	17,52	11,2	101,3	0+580	17,20	12,8	100,1%
0+660	17,73	13,2	100,5	0+660	17,91	13,0	101,3	0+660	17,82	14,0	100,4%

Fonte: Autora (2014).

Quadro 4.16 - Controle da 1ª, 2ª e 3ª camada final de terraplenagem. Segmento 05

Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)
1+580	17,32	7,8	100,4%
1+580	17,44	7,8	101,1%
1+640	19,43	9,1	100,8%
1+740	19,44	11,5	100,8%
1+840	19,47	12,0	101,0%
1+877	17,34	9,8	100,3%

Fonte: Autora (2014).

Em todos os segmentos foram atingidos o grau de compactação e a umidade ótima obtidos nos ensaios de compactação. Não foi possível medir a deflexão sobre a camada final de terraplenagem devido à constituição do material, pois a ponta de prova da viga afundava na camada de areia. O módulo resiliente desta camada foi estimado por retroanálise.

4.4.2 Camada de Sub-Base

A camada de sub-base em todos os segmentos possui 20 cm de espessura. Foi executada em macadame seco conforme especificação complementar de projeto baseada na norma DEINFRA-SC ES-P 03/92.

A camada de macadame seco é constituída de agregados graúdos britados preenchidos mecanicamente com material fino. O agregado graúdo possui diâmetro máximo de 100 mm (4”), proveniente exclusivamente de material da britagem primária, denominado pedra pulmão. O material fino utilizado para enchimento é composto por 50% de agregado de diâmetro de 9,5 mm (3/8") e 50% de agregado de 19,0 mm (3/4"). Esse mesmo material também compõe a chamada camada de bloqueio, que se trata de uma fina camada espalhada sobre a camada final de terraplenagem, com a função de minimizar o “agulhamento” do material graúdo no subleito. Todavia, quando da utilização de solos pouco coesivos, como ocorre com os segmentos monitorados, é praticamente impossível impedir a penetração de parte do agregado graúdo na camada do subleito.

A execução da camada de sub-base é composta por três etapas de execução: Primeiramente, espalha-se o material fino (diâmetro de 3/4” e 3/8”) denominado “bloqueio”. Na segunda etapa, procede-se ao espalhamento do material graúdo (agregado com diâmetro de 1” a 4”). Na terceira faz-se o “travamento” com agregados mais finos (diâmetro de 3/4” e 3/8”) a fim de fechar os vazios e aumentar o entrosamento dos grãos, seguido de compactação.

Ressalta-se que após o lançamento do material graúdo a camada não pode ser compactada até que seja lançado o material de travamento, pois a compactação pode impedir o enchimento dos vazios pelo material fino, faz-se apenas um passada do rolo liso para conformação.

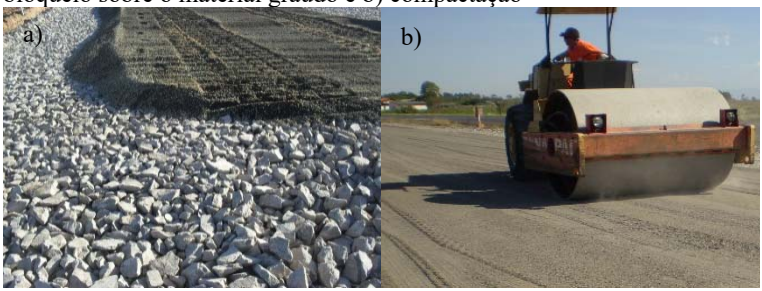
O controle dos materiais foi realizado através de ensaio de granulometria do agregado graúdo. Os resultados obtidos estão mostrado no Quadro 4.17. A Figura 4.7 mostra a sequência executiva dos serviços relativos a camada de sub-base.

Quadro 4.17 - Granulometria média do agregado graúdo utilizado na sub-base

Peneira de malha quadrada		Percentagem Passando
Série ASTM	Abertura (mm)	
4"	101,6	100
3 1/2"	88,9	97,3
3"	76,2	89,3
2 1/2"	63,5	68,6
2"	50,8	32,6
1 1/2"	38,1	12,8
1"	25,4	3,2

Fonte: Autora (2012).

Figura 4.7 - Sequência executiva da camada de sub-base: a) espalhamento do bloqueio sobre o material graúdo e b) compactação



Fonte: Autora (2012).

A verificação expedita da eficiência da compactação foi feita através da abertura de poços de inspeção a fim de analisar a condição de preechimento dos vazios do agregado graúdo, conforme ilustrado na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Controle expedito da camada de sub-base

Fonte: Autora (2012).

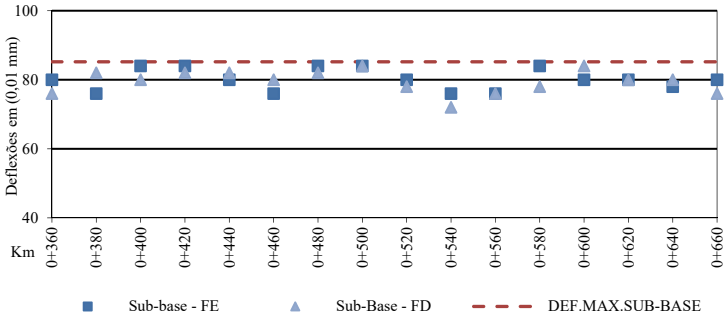
Como requisito para a aceitação da camada de sub-base foi feito o levantamento das deflexões com viga Benkelman. A Figura 4.9 mostra a execução do levantamento deflectométrico sobre a camada de sub-base.

Figura 4.9 - Levantamento das deflexões na sub-base, com medida de bacia

Fonte: Autora (2012).

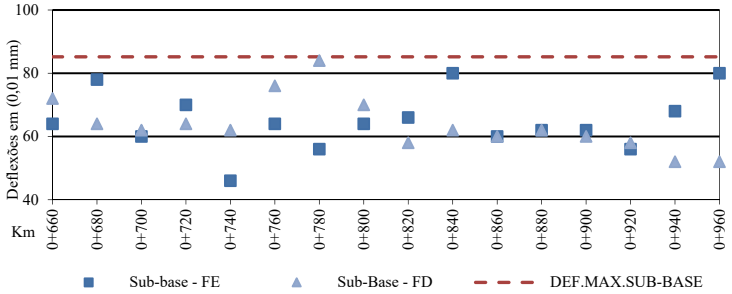
Os resultados obtidos, bem como a análise estatística estão mostrados nas Figuras 4.10 a 4.14 e Quadro 4.18.

Figura 4.10 - Deflexões na sub-base. Segmento monitorado 01



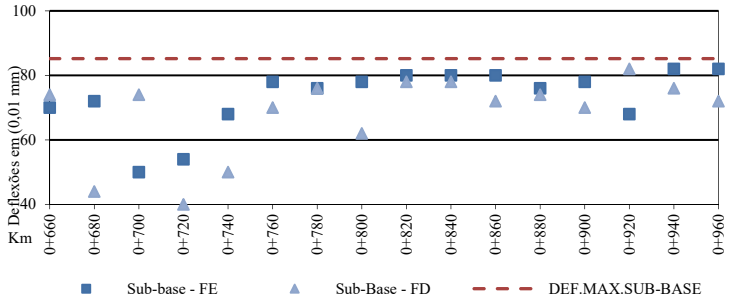
Fonte: Autora (2012).

Figura 4.11 - Deflexões na sub-base. Segmento monitorado 02



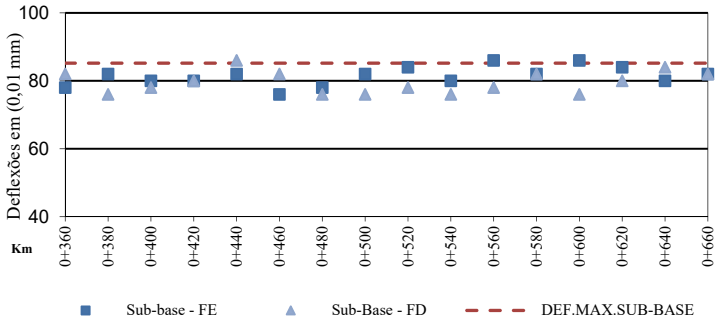
Fonte: Autora (2012).

Figura 4.12 - Deflexões na sub-base. Segmento monitorado 03



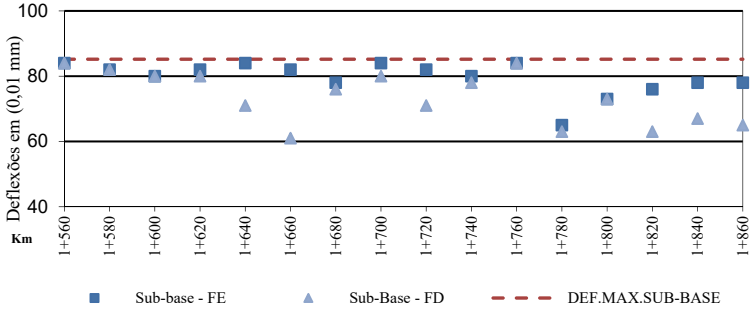
Fonte: Autora (2012).

Figura 4.13 - Deflexões na sub-base. Segmento monitorado 04



Fonte: Autora (2012).

Figura 4.14 - Deflexões na sub-base. Segmento monitorado 05



Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.18 - Análise estatística das deflexões na sub-base

Segmentos	Posição	Média ($x10^{-2}$mm)	Desv.Pad. ($x10^{-2}$mm)	C.V (%)	Def. Característica ($x10^{-2}$mm)
1	FD	79,5	3,3	4,2	82,8
	FE	80,1	3,1	3,9	83,2
2	FD	63,6	8,4	13,2	72,0
	FE	64,8	9,1	14,0	73,9
3	FD	68,3	12,6	18,4	80,9
	FE	73,3	9,5	13,0	82,8
4	FD	79,5	3,2	4,0	82,7
	FE	81,4	2,8	3,4	84,2
5	FD	73,6	8,0	10,9	81,6
	FE	79,5	5,0	6,3	84,5

Fonte: Autora (2012).

Em todos os segmentos, a deflexão característica da camada de sub-base foi inferior a deflexão admissível de $85{,}2x10^{-2}$ mm estimada em projeto (Quadro 3.3). As deflexões são semelhantes, tanto para a faixa direita quanto para a faixa esquerda.

A variabilidade dos resultados foi maior para os segmentos 02 e 03, apresentando desvio padrão de até $12{,}6x10^{-2}$ mm. Esses segmentos também apresentaram os menores valores de deflexão. A semelhança entre esses dois segmentos se dá pelo fato de serem contíguos.

Os segmentos 01 e 04 também são contíguos e apresentaram características semelhantes com relação as deflexões. As maiores deflexões foram medidas nesses segmentos.

Para o segmento 05 as deflexões foram semelhantes às medidas nos segmentos 02 e 03. Os materiais utilizados nesses três segmentos foram provenientes das jazidas Osni e Moacir, enquanto que nos segmentos 01 e 04, utilizou-se apenas materiais da jazida Edilson.

Apesar disso, e do fato de que as deflexões medidas com viga Benkelman são sempre bastante suscetíveis às condições de realização dos levantamentos (operador, condições climáticas, etc.), o coeficiente de variação teve valor máximo 18,4%, evidenciando certa homogeneidade dos dados.

4.4.3 Camada de base

A camada de base utilizada na construção dos segmentos monitorados foi do tipo brita graduada simples. A execução seguiu os preceitos constantes na norma DNIT 141/2010 – ES.

A granulometria do material se enquadra dentro dos limites da faixa A, especificada na mesma norma.

Os materiais britados utilizados atendem a recomendação normativa no que diz respeito aos parâmetros de resistência à abrasão, durabilidade e índice de forma, conforme verificado nos ensaios de caracterização dos agregados minerais.

Os Quadros 4.19 e 4.20 apresentam as características tecnológicas da brita graduada. A Figura 4.15 apresenta a curva granulométrica empregada, bem como os limites correspondentes à faixa A e faixa de trabalho.

Quadro 4.19 - Distribuição granulométrica dos agregados

Peneira de malha quadrada		Brita 1 1/2	Brita 3/4	Pedrisco	Pó
Série ASTM	Abertura (mm)				
2"	50,8	100	100	100	100
1 1/2"	38,1	100	100	100	100
1"	25,4	76,6	100	100	100
3/4"	19,1	30,1	100	100	100
1/2"	12,7	2,0	47,2	100	100
3/8"	9,52	0,6	16,6	100	100
Nº 4	4,76	0,3	0,5	25,2	98,5
Nº 10	2,00	0	0,4	3,1	61,6
Nº 40	0,42	0	0	0	25,8
Nº 200	0,074	0	0	0	16,3

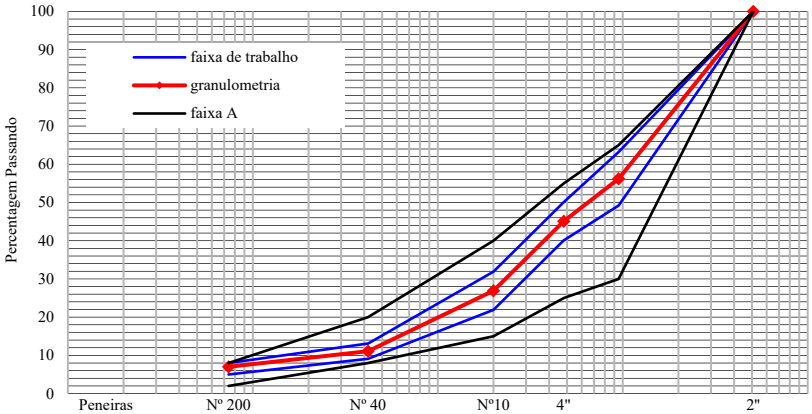
Fonte: Adaptado de DNIT (2011).

Quadro 4.20 - Granulometria da mistura

Peneira de malha quadrada		Mistura	Faixa A (DNIT 141/2010 – ES)	Faixa de Trabalho	Tolerâncias (+/-)
Série ASTM	Abertura (mm)				
2"	50,80	100	100	100	7
3/8"	9,52	56,2	30 - 65	49,2 63,2	7
Nº 4	4,76	45,1	25 - 55	40,1 -50,1	5
Nº 10	2,00	26,9	15 - 40	21,9 31,9	5
Nº 40	0,42	11,1	8 - 20	9,1 13,1	2
Nº 200	0,074	7,0	2 - 8	5,0 -8,0	2

Fonte: Adaptado de DNIT (2011).

Figura 4.15 - Curva granulométrica da brita graduada



Fonte: DNIT (2011).

O Quadro 4.21 mostra os resultados da caracterização da brita graduada. A Figura 4.16 apresenta as etapas da execução da camada de base nos segmentos.

Quadro 4.21 - Características da mistura

Massa específica aparente seca máxima (kN/m³)	24,69
Umidade ótima (%)	6,7
ISC (%)	222
Expansão (%)	0,0
Equivalente de areia (%)	64,1

Fonte: Adaptado de DNIT (2011)

Figura 4.16 - Execução de base de brita graduada a) material espalhado na pista; b) detalhe da granulometria da mistura; c) correção de umidade e d) aspecto final da camada compactada

Fonte: Autora (2012).

A caracterização dos materiais da camada de base envolveu ensaios de equivalente de areia (DNER-ME 054-97), granulometria (DNER-ME 080/97), compactação (DNER-ME 129/94) e ISC (DNER-ME 049-94). A caracterização foi feita para amostras coletadas a cada 200 metros de pista.

O controle da execução da camada de base foi efetuado através da verificação do grau de compactação pelo ensaio de massa específica aparente seca “in situ” e umidade. O grau de compactação e a umidade ótima de campo foram comparados àqueles obtidos em laboratório. Dessa forma, para a camada de base, em todos os segmentos, os parâmetros especificados foram alcançados. Os resultados do controle da execução da camada de base estão mostrados nos Quadro de 4.22 a 4.26.

Quadro 4.22 - Controle da camada de base. Segmento 01

Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)
0+320	25,03	6,4	101,4
0+420	25,10	7,3	101,7
0+520	24,76	7,7	100,3
0+620	24,86	6,3	100,7

Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.23 - Controle da camada de base. Segmento 02

Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)
0+660	25,05	4,5	100,8
0+690	25,12	4,7	101,1
0+720	24,93	4,9	100,4
0+740	25,22	6,9	101,6
0+770	24,95	5,7	100,5
0+800	25,14	7,7	101,3
0+830	25,00	7,1	100,7
0+860	25,21	4,5	101,6
0+890	24,88	7,1	100,3
0+920	24,88	4,8	100,3
0+950	24,99	7,1	100,7

Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.24 - Controle da camada de base. Segmento 03

Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)
0+660	25,00	5,0	100,6
0+680	25,15	5,1	101,3
0+710	25,07	4,9	100,9
0+740	25,10	4,8	101,0
0+790	26,02	5,9	102,7
0+820	25,84	6,0	102,0
0+850	25,52	6,0	100,7
0+880	25,72	7,1	101,5
0+910	25,46	6,3	100,5
0+940	25,48	6,3	100,6
0+970	25,68	6,2	101,4

Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.25 - Controle da camada de base. Segmento 04

Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)
0+340	25,06	7,1	101,5
0+440	24,71	7,5	100,1
0+540	24,91	6,6	100,9
0+640	24,79	5,1	100,4

Fonte: Autora (2012).

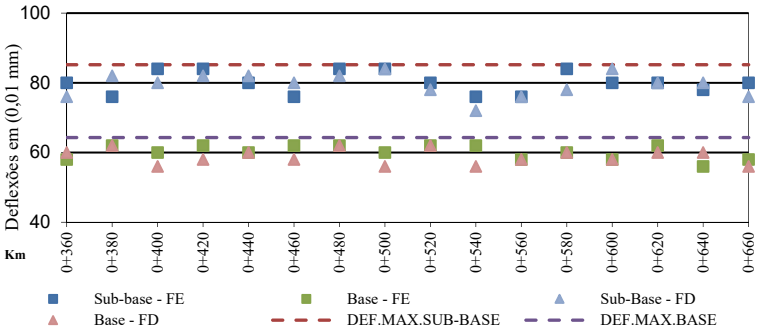
Quadro 4.26 - Controle da camada de base. Segmento 05

Estaca (km)	MEAS (kN/m³)	h (%)	GC (%)
1+580	25,11	5,9	101,7
1+640	24,86	7,6	100,7
1+740	24,94	7,0	101,0
1+840	24,81	8,7	100,5

Fonte: Autora (2012).

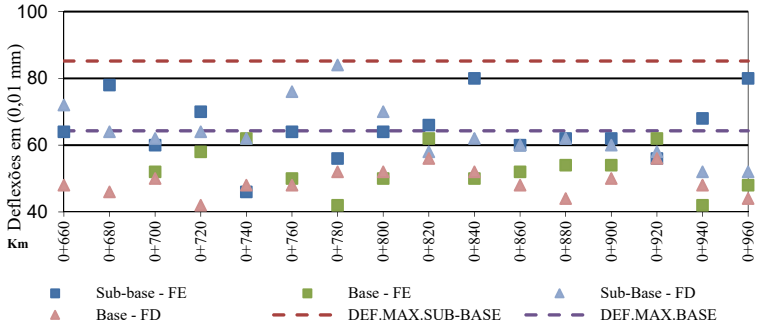
Os resultados dos levantamentos deflectométricos, bem como a análise estatística para cada segmento monitorado estão mostrados nas Figuras 4.17 a 4.21 e Quadro 4.27.

Figura 4.17 - Deflexões na camada de base. Segmento 01



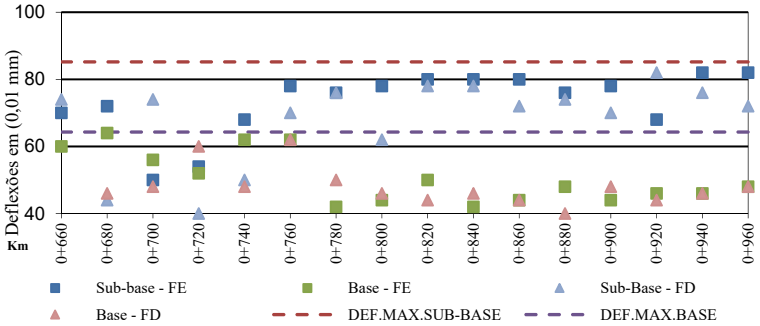
Fonte: Autora (2012).

Figura 4.18 - Deflexões na camada de base. Segmento 02



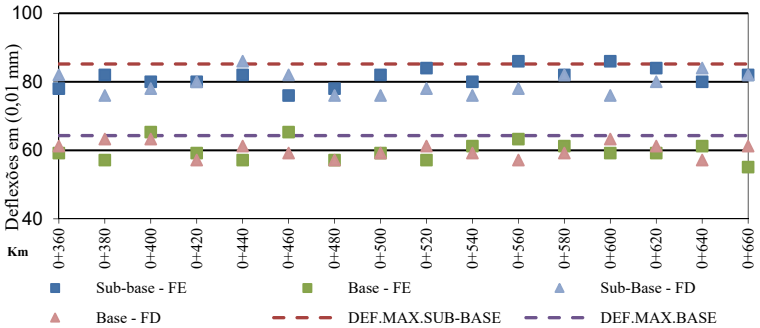
Fonte: Autora (2012).

Figura 4.19 - Deflexões na camada de base. Segmento 03



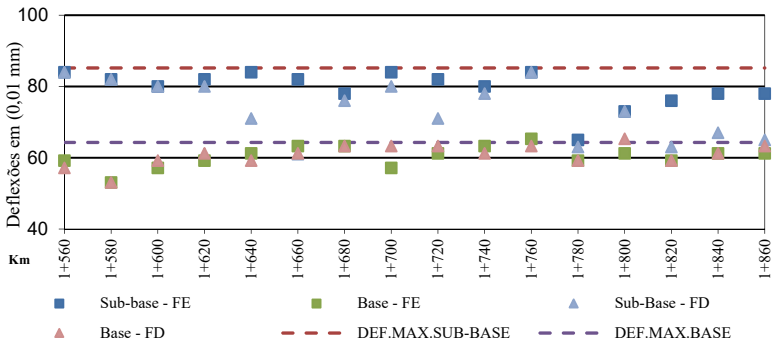
Fonte: Autora (2012).

Figura 4.20 - Deflexões na camada de base. Segmento 04



Fonte: Autora (2012).

Figura 4.21 - Deflexões na camada de base. Segmento 05



Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.27 - Análise estatística das deflexões na base

Segmentos	Posição	Média ($x10^{-2}$mm)	Desv.Pad. ($x10^{-2}$mm)	C.V (%)	Def. Característica ($x10^{-2}$mm)
1	FD	58,9	2,2	3,7	61,1
	FE	60,1	2,0	3,3	62,1
2	FD	49,0	4,0	8,2	53,0
	FE	50,9	7,9	15,5	58,8
3	FD	47,3	6,4	13,5	53,7
	FE	50,6	7,7	15,2	58,3
4	FD	60,1	2,2	3,7	62,3
	FE	59,8	3,0	5,0	62,8
5	FD	60,8	3,0	4,9	63,8
	FE	60,3	3,0	5,0	63,3

Fonte: Autora (2012).

Os resultados obtidos atendem a deflexão admissível especificada em projeto (Quadro 3.3) para a camada de base que é de $64x10^{-2}$mm.

Foi obtido desvio padrão máximo de $7,9x10^{-2}$mm e coeficiente de variação máximo 15,5%, caracterizando uniformidade nos levantamentos. Como era esperado, a camada de base reduziu as deflexões na estrutura. A maior redução foi para o segmento 03 que possuía uma deflexão na sub-base de $80,9x10^{-2}$mm e $82,7x10^{-2}$mm, para as respectivas faixas direita e esquerda, passando para $53,7x10^{-2}$mm e $58,3x10^{-2}$mm após a execução da base. O reduzido coeficiente de variação também indica ligeira homogeneização das deflexões.

4.4.4 Pinturas

4.4.4.1 Imprimação

A imprimação da camada de base foi executada com asfalto diluído do tipo CM-30.

O controle da execução foi feito através da verificação da temperatura e do controle visual da homogeneidade da aplicação e da penetração do material na camada de base.

Foram feitos ensaios para a determinação da taxa de aplicação do ligante mediante a colocação de bandejas de massa conhecida na superfície da camada a ser imprimada, conforme o disposto na norma DNIT 144/2012-ES. As taxas de aplicação dos segmentos estão mostradas no Quadro 4.28.

Quadro 4.28 - Taxas de imprimação

Características	Segmento 01	Segmento 02	Segmento 03	Segmento 04	Segmento 05
Comprimento (m)	300	300	300	300	300
Largura (m)	12	12	12	12	12
Área (m²)	3600	3600	3600	3600	3600
Taxa (kg/m²)	1,02	1,10	1,10	1,03	1,07
Densidade	0,925	0,925	0,925	0,925	0,925
Taxa (l/m²)	1,10	1,19	1,19	1,10	1,16

Fonte: Autora (2012).

A execução da imprimação da camada de base, bem como o ensaio para a determinação da taxa de aplicação do ligante estão mostrados na Figura 4.22.

Figura 4.22 - Execução de imprimação e verificação da taxa de aplicação

Fonte: Autora (2012).

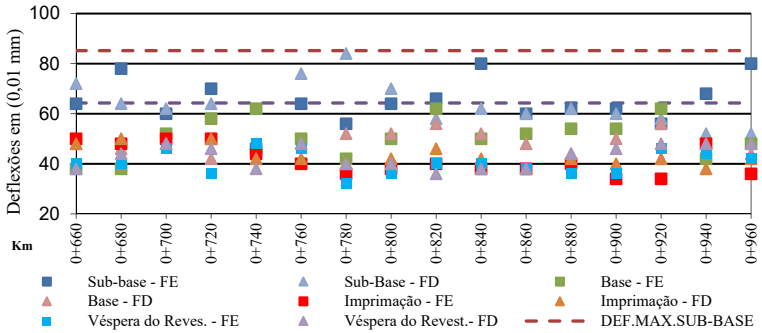
Sobre a camada de base imprimada foram feitos 2 novos levantamentos de deflexões, porém apenas para os segmentos 02 e 03. Os levantamentos foram da seguinte forma:

a) medição de deflexão após a cura da imprimação e;

b) medição de deflexão na véspera da execução do revestimento.

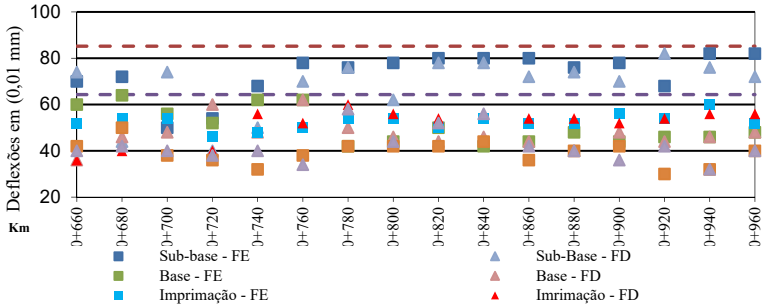
Os valores obtidos e a análise estatística estão mostrados nas Figuras de 4.23 e 4.24 e Quadro 4.29.

Figura 4.23 - Deflexões na base após a cura da imprimação e na véspera da execução do revestimento. Segmento 02



Fonte: Autora (2012).

Figura 4.24 - Deflexões na base após a cura da imprimação e na véspera da execução do revestimento. Segmento 03



Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.29 - Análise estatística das deflexões na base após a imprimação e na véspera de execução do revestimento

Segmentos	Posição	Média ($x10^{-2}$mm)	Desv.Pad. ($x10^{-2}$mm)	C.V (%)	Def. Característica ($x10^{-2}$mm)
2 (a)	FD	43,3	3,4	7,9	46,7
	FE	41,5	5,9	14,2	47,4
3 (a)	FD	50,3	7,5	14,9	57,8
	FE	52,6	3,2	6,1	55,8
2 (b)	FD	43	4,6	10,7	47,6
	FE	40,4	4,6	11,4	45,0
3 (b)	FD	42,3	7,3	17,3	49,6
	FE	39,1	5,1	13,0	44,2

Fonte: Autora (2012).

As deflexões na camada de base após a execução da imprimação foram, em geral, menores do que às medidas antes da imprimação. Essa diminuição das deflexões foi considerável para o segmento 02 e irrelevante para o segmento 03, apesar de que os dois segmentos apresentaram mesma taxa de imprimação.

Entretanto, para as medições efetuadas na véspera da execução do revestimento, o segmento 02 permaneceu com as deflexões praticamente inalteradas, enquanto que, no segmento 03 houve decréscimo das deflexões, passando dos valores de 55,9 $x10^{-2}$mm, e 57,8 $x10^{-2}$mm, para 44,2 $x10^{-2}$mm, e 49,5 $x10^{-2}$mm, respectivamente.

4.4.4.2 Pintura de Ligação

A emulsão asfáltica utilizada na pintura de ligação foi do tipo RR-2C. O produto é de origem da empresa FASFPAR Fabrica de Asfaltos (Ponta Grossa-PR) e distribuído pela BR Distribuidora.

A caracterização do produto foi feita pelo fabricante. Os resultados estão apresentados no Quadro 4.30.

Quadro 4.30 - Caracterização da emulsão asfáltica RR-2C

Características	Método	Especificação	Resultados
Resíduo mín, %/m	ABNT NBR-14376	Mín. 67	67,1
Viscosidade Saybolt-Furol a 50°C, s	ABNT NBR-14491	100-400	253
Peneira retido na malha 20, %	ABNT NBR-14393	Máx. 0,1	0
Desemulsibilidade, %	ABNT NBR-6569	Mín. 50	55

A diluição do produto foi de 1litro de emulsão para cada litro de água. A taxa empregada foi da ordem de 0,8 a 1,0 l/m².

4.4.5 Revestimento Asfáltico

A produção do concreto asfáltico usinado a quente foi feita em uma usina de asfalto do tipo volumétrica da marca Terex, modelo Magnun 140, com capacidade de até 140 t/h.

As instalações industriais de britagem dos agregados e de produção da mistura asfáltica situavam-se a 24 km do local da obra.

Após a produção, a mistura asfáltica seguia em caminhões basculantes, devidamente cobertos por lona, até o local da obra. A aplicação da mistura pela vibro acabadora era acompanhada por um rolo compactador liso Dynapac CC21, que atuava na correção das juntas e imperfeições deixadas pelo equipamento. Em seguida prosseguia-se com a compactação com 2 rolos de pneus Dynapac CP 224 de 21 t. A pressão utilizada nos pneus era menor no início da compactação e aumentava conforme a sequência de compactação, tendo sido feitas 12 coberturas por camada. Para acabamento da camada era utilizado 1 rolo compactador liso Dynapac CC422 de 10,4 t. A execução da camada seguiu as diretrizes na Especificação de Serviço DNIT 031/2004 – ES.

As Figuras 4.25 e 4.26 mostram a sequência executiva da camada do revestimento em mistura asfáltica convencional e em asfalto-borracha, respectivamente.

Figura 4.25 - Execução de revestimento asfáltico convencional

Fonte: Autora (2012).

Figura 4.26 - Execução do revestimento com asfalto-borracha

Fonte: Autora (2012).

O ligante asfáltico também foi caracterizado no momento da chegada do carregamento no canteiro de obras. Os Quadros 4.31 ao 4.34 apresentam os resultados da caracterização dos ligantes utilizados.

O controle de execução da mistura de concreto asfáltico foi feito através da análise das características do material durante as etapas de usinagem, aplicação da mistura e compactação na pista.

As características finais, como espessura e grau de compactação, bem como, a análise do desempenho das misturas utilizadas foi efetuada através da retirada de amostras da pista e pela moldagem de corpos de prova em laboratório.

Quadro 4.31 - Caracterização do ligante convencional utilizado no segmento 01

Características	Método	Especificação	Resultados	
Penetração, 0,1 mm	DNER-ME- 003/99	50 a 70	55	54
Viscosidade Saybolt-Furol, ssf	ABNT NBR - 14950	mín. 30	32,12	38,94
Ponto de fulgor, °C	ABNT NBR - 11341	mín. 235	275	296
Procedência			REPAR	REPAR

Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.32 - Caracterização do ligante convencional utilizado no segmento 02

Características	Método	Especificação	Resultados	
Penetração, 0,1 mm	DNER-ME- 003/99	50 a 70	59	58
Viscosidade Saybolt-Furol, ssf	ABNT NBR - 14950	mín. 30	39,13	36,28
Ponto de fulgor, °C	ABNT NBR - 11341	mín. 235	326	306
Procedência			REFAP	REFAP

Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.33 - Caracterização do asfalto-borracha utilizado no segmento 03

Características	Método	Especificação	Resultados
Penetração, 0,1 mm	DNER-ME- 003/99	30 a 70	46
Ponto de amolecimento, ºC	ABNT NBR - 6560	mín. 55	63
Ponto de fulgor, °C	ABNT NBR - 11341	mín. 235	289
Procedência			GRECA

Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.34 - Caracterização do ligante convencional utilizado no segmento 03

Características	Método	Especificação	Resultados	
Penetração, 0,1 mm	DNER-ME- 003/99	50 a 70	60	50
Viscosidade Saybolt-Furol, ssf	ABNT NBR - 14950	mín. 30	40,28	39,15
Ponto de fulgor, °C	ABNT NBR - 11341	mín. 235	296	282
Procedência			REPAR	REPAR

Fonte: Autora (2012).

4.4.5.1 Controle de usinagem, aplicação e compactação

O controle do concreto asfáltico durante a fase de usinagem envolveu ensaios de granulometria dos agregados dos silos frios e controle de temperatura. Também foram moldados corpos de prova para verificação das características Marshall da mistura e para a realização de ensaios de resistência a tração e módulo resiliente.

Durante a etapa de aplicação e compactação foram feitos o controle das temperaturas da mistura no momento da chegada do caminhão na pista, durante o espalhamento e no início da compactação. Foram coletadas amostras para a realização de ensaios para a determinação do teor de ligante e da granulometria.

a) Teor de ligante

A determinação do teor de ligante da mistura foi feita com o equipamento Soxhlet, através da norma DNIT 158/2011-ME. Os resultados obtidos estão mostrados no Quadro 4.35.

Quadro 4.35 - Teor de ligante dos segmentos monitorados

Segmento	Teor de ligante (média de três amostras, %)		
	1ª camada	2ª camada	3ª camada
1	4,40	4,35	4,39
2	4,12	4,32	4,15
3	5,37	4,23	4,30
4	4,38	4,41	4,28
5	4,43	4,40	4,40

Fonte: Autora (2012).

O teor de ligante para todos os segmentos ficou dentro do previsto em projeto. A percentagem de ligante nas misturas asfálticas atendeu o definido na norma DNIT 031/2016 – ES, que limita em ±0,3% de diferença de betume em relação ao projeto. O valor do teor de projeto é de 5,4% para a mistura asfáltica com asfalto-borracha (1ª camada de revestimento do segmento 03) e 4,15% para os demais.

b) Controle da temperatura

A faixa de temperatura obtida na curva viscosidade *versus* temperatura (Figura 4.5) para a usinagem da mistura com ligante convencional (CAP 50/70) ficou compreendida entre 155°C a 162°C e para a compactação da mistura foi de 144°C a 149°C. Para a mistura com asfalto-borracha as temperaturas foram fornecidas pelo fabricante, sendo de 170°C a 177°C para usinagem e 155°C a 165°C para a compactação. Os agregados foram aquecidos a uma temperatura de aproximadamente 10°C acima da temperatura do ligante.

As temperaturas foram medidas no momento do carregamento do caminhão na usina, na chegada à pista, durante a aplicação e antes do início da compactação. Os resultados estão apresentados no Apêndice A.

A compactação da camada asfáltica é uma etapa de grande importância na execução dos pavimentos. Erros na operação da vibroacabadora e no uso dos rolos compactadores podem comprometer todas as etapas anteriores, mesmo que tenham sido bem executadas.

Existe uma faixa ideal para a compactação das misturas asfálticas que está relacionada com a viscosidade do ligante utilizado. Quando a

compactação extrapola os limites dessa faixa, ou seja, se a temperatura está mais elevada a mistura tende a fluir e deforma-se devido a maior lubrificação dos agregados pelo ligante. Por outro lado, quando a temperatura for baixa, o ligante torna-se extremamente viscoso, prejudicando a trabalhabilidade (BERNUCCI, *et al*., 2008).

A compactação da mistura com temperatura abaixo da temperatura mínima indicada ocorreu em quase todos os segmentos, principalmente nas duas primeiras camadas, à exceção do segmento 03, onde a primeira camada foi executada com asfalto-borracha. A temperatura de compactação da terceira camada esteve dentro do limite recomendado, exceto para os segmentos 01 e 04 onde a compactação iniciou com temperatura superior ao indicado. Analisando os valores obtidos estatisticamente para o grau de compactação, nota-se que apesar da prática comum a quase todos os segmentos de realizar a compactação com temperaturas abaixo do recomendado, não houve nenhum segmento com grau de compactação inferior ao exigido em norma.

Contudo, esse fato não exclui a necessidade de atenção a essa importante etapa da execução dos revestimentos. A perda de temperatura da mistura asfáltica aplicada nos segmentos ocorreu em grande parte durante o tempo decorrido entre o percurso do caminhão na saída da usina e o início da aplicação da mistura na pista. Para todos os segmentos essa perda de temperatura foi em média de 11°C em um intervalo de tempo médio de 90 minutos. O resfriamento da mistura após o início do espalhamento até a compactação foi da ordem de 5°C em um tempo médio de 10 minutos. Esse resfriamento foi mais rápido para a primeira camada onde ocorre grande diferença térmica entre a mistura asfáltica e a camada de base.

c) Grau de compactação e espessura das camadas

A eficiência da compactação das camadas de revestimento foi avaliada através da comparação entre a massa específica aparente da mistura obtida em campo e a massa específica aparente de projeto, conforme preconiza a norma DNIT 031/2006 ES. Os resultados estão mostrados no Quadros de 4.36 a 4.38.

Quadro 4.36 - Espessura e grau de compactação da 1ª e 2ª camada. Segmento 01

Localização		Espessura Média (cm)	Massa Específica Aparente (g/cm³)		G.C(%)
Estaca (km)	Lado		Pista	Projeto	
0+340	EX	10,46	2,564	2,600	98,6
0+400	BE	10,19	2,592	2,600	99,7
0+460	EX	11,25	2,586	2,600	99,5
0+520	BD	10,10	2,584	2,600	99,4
0+580	EX	12,16	2,591	2,600	99,7
0+640	BD	11,66	2,579	2,600	99,2
Análise Estatística					
Média		10,97	2,583		99,3
n					6
s					0,40
k					1,41
Valor máximo					99,9
Valor mínimo					98,8

Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.37 - Espessura e grau de compactação da 3ª camada. Segmento 01

Localização		Espessura Média (cm)	Massa Específica Aparente (g/cm³)		G.C(%)
Estaca (km)	Lado		Pista	Projeto	
0+340	EX	5,21	2,578	2,600	99,2
0+400	BE	5,76	2,596	2,600	99,8
0+460	EX	5,64	2,583	2,600	99,3
0+520	BD	5,70	2,559	2,600	98,4
0+580	EX	5,29	2,562	2,600	98,5
0+640	BE	5,82	2,574	2,600	99,0
Análise Estatística					
Média		5,57	2,583		99,1
n					6
s					0,53
k					1,41
Valor máximo					99,8
Valor mínimo					98,3

Fonte: Autora (2012).

A espessura média do revestimento asfáltico no segmento 01 foi de 16,5 cm, portanto maior que o projetado. Como pode ser visto, o grau de compactação atendeu ao mínimo previsto em norma que é de 97%. A percentagem de volume de vazios para o segmento 01 foi, em média, de 4,51% para a 1ª e 2ª camada e de 4,8% para a 3ª camada. A variação média de espessura prevista em norma é de ±5%, o que significa que uma camada de revestimento de 15 cm poderia variar entre 14,25 cm e 15,75 cm. Dessa forma, a espessura do revestimento no segmento 01 teve uma variação em relação ao projeto superior ao previsto em norma.

No segmento 02 a média de espessura para a camada de revestimento atendeu o projeto. O grau de compactação e a espessura atenderam o previsto em norma e o volume de vazios foi de 4,4%.

Quadro 4.38 - Espessura e grau de compactação da 1ª, 2ª e 3ª camada. Segmento 02

Localização		Espessura Média (cm)	Massa Específica Aparente (g/cm³)		G.C(%)
Estaca (km)	Lado		Pista	Projeto	
0+680	BE	19,28	2,592	2,600	99,7
0+700	BD	17,70	2,595	2,600	99,8
0+720	BE	17,48	2,612	2,600	100,5
0+740	BD	17,85	2,568	2,600	98,8
0+760	BE	17,05	2,606	2,600	100,2
0+780	BD	17,88	2,606	2,600	100,2
0+800	BE	16,73	2,601	2,600	100,0
0+800	BD	18,13	2,598	2,600	99,9
0+820	BE	17,18	2,611	2,600	100,4
0+840	BE	18,25	2,600	2,600	100,0
0+840	BE	18,03	2,574	2,600	99,0
0+860	BE	18,63	2,594	2,600	99,8
0+860	BD	18,00	2,583	2,600	99,3
0+880	BE	18,88	2,585	2,600	99,4
0+900	BD	17,68	2,595	2,600	99,8
0+920	BD	18,90	2,597	2,600	99,9
0+940	BE	20,28	2,466	2,600	94,8
0+960	BE	18,88	2,589	2,600	99,6
0+960	BD	17,88	2,580	2,600	99,2
Análise Estatística					
Média		18,1	2,587		99,5
n					19,0
s					0,9
k					1,04
Valor máximo					100,4
Valor mínimo					98,6

Fonte: Autora (2012).

O Quadro 4.39 mostra o valor obtido para a espessura e grau de compactação da primeira camada de revestimento, em asfalto borracha. Tanto a espessura, quanto o grau de compactação atenderam o projetado. A porcentagem de volume de vazios foi em média 4,4%.

A porcentagem de volume de vazios da mistura asfáltica foi em média de 5,7% para a 2ª camada e de 5,5% para a 3ª camada do segmento 03. O grau de compactação de ambas as camadas atendeu o valor mínimo previsto em norma.

Quadro 4.39 - Espessura e grau de compactação da 1ª camada. Segmento 03

Localização		Espessura Média (cm)	Massa Específica Aparente (g/cm³)		GC (%)
Estaca (km)	Lado		Pista	Projeto	
0+660	BE	5,83	2,488	2,565	97,0
0+660	BD	7,00	2,551	2,565	99,5
0+680	BE	5,78	2,575	2,565	100,4
0+680	BD	7,23	2,533	2,565	98,8
0+700	BE	5,68	2,576	2,565	100,4
0+700	BD	6,15	2,563	2,565	99,9
0+720	BE	5,95	2,566	2,565	100,0
0+720	BD	4,95	2,550	2,565	99,4
0+740	BE	6,68	2,324	2,565	90,6
0+740	BD	6,20	2,565	2,565	100,0
0+760	BE	5,83	2,572	2,565	100,3
0+760	BD	5,73	2,548	2,565	99,3
0+780	BE	6,10	2,546	2,565	99,3
0+780	BD	6,03	2,536	2,565	98,9
0+800	BE	5,90	2,561	2,565	99,8
0+800	BD	5,75	2,555	2,565	99,6
0+820	BE	5,70	2,555	2,565	99,6
0+820	BD	6,35	2,56	2,565	99,8
0+840	BE	6,08	2,556	2,565	99,6
0+840	BD	6,53	2,546	2,565	99,3
0+860	BE	6,75	2,540	2,565	99,0
0+860	BD	6,20	2,555	2,565	99,6
0+880	BE	5,98	2,542	2,565	99,1
0+880	BD	6,45	2,544	2,565	99,2
0+900	BE	5,70	2,564	2,565	99,9
0+900	BD	6,45	2,550	2,565	99,4
0+920	BE	5,78	2,567	2,565	100,1
0+920	BD	5,70	2,551	2,565	99,4
0+940	BE	5,83	2,536	2,565	98,9
0+940	BD	6,45	2,564	2,565	100,0
0+960	BE	6,15	2,562	2,565	99,9
0+960	BD	6,75	2,536	2,565	98,9
0+980	BE	5,98	2,535	2,565	98,8
0+980	BD	5,95	2,572	2,565	100,3
Análise Estatística					
Média		6,10	2,545		99,2
n					34
s					0,5
k					1,01
Valor máximo					99,7
Valor mínimo					98,7

Fonte: Autora (2012).

Os Quadros 4.40 e 4.41 mostram o cálculo do grau de compactação da segunda e terceira camada do segmento 03. Para o cálculo foram extraídas amostras das três camadas juntas e após feito a separação em camadas. No entanto, para a obtenção da espessura total do segmento, foi considerada a espessura das três camadas juntas, que foi de 17,1 cm.

Quadro 4.40 - Espessura e grau de compactação da 2ª camada. Segmento 03

Localização		Massa Específica Aparente (g/cm³)		G.C (%)
Estaca (km)	Lado	Pista	Projeto	
0+660	BD	2,527	2,600	97,2
0+760	BE	2,571	2,600	98,9
0+860	BD	2,564	2,600	98,6
0+880	BE	2,549	2,600	98,0
0+960	BD	2,545	2,600	97,9
Análise Estatística				
Média		2,551		98,1
n				5,0
s				0,05
k				1,55
Valor máximo				98,2
Valor mínimo				98,0

Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.41 - Espessura e grau de compactação da 3ª camada. Segmento 03

Localização		Massa Específica Aparente (g/cm³)		G.C (%)
Estaca (km)	Lado	Pista	Projeto	
0+660	BD	2,563	2,600	98,6
0+760	BE	2,560	2,600	98,5
0+860	BD	2,558	2,600	98,4
0+880	BE	2,553	2,600	98,2
0+960	BD	2,552	2,600	98,2
Análise Estatística				
Média		2,557		98,4
n				5,0
s				0,05
k				1,55
Valor máximo				98,5
Valor mínimo				98,3

Fonte: Autora (2012).

A espessura média do segmento 04 foi de 16,2 cm, ou seja, 1,2 cm maior que o projetado. O grau de compactação ficou dentro dos limites aceitáveis. A porcentagem de volume de vazios da mistura foi de 5,3% para a 1ª e 2ª camada e de 4,8% para a 3ª camada. Os resultados estão mostrados nos Quadros 4.42 e 4.43.

Quadro 4.42 - Espessura e grau de compactação da 1ª e 2ª camada. Segmento 04

Localização		Espessura Média (cm)	Massa Específica Aparente (g/cm³)		G.C(%)
Estaca (km)	Lado		Pista	Projeto	
0+340	EX	10,70	2,551	2,600	98,1
0+400	BE	10,60	2,582	2,600	99,3
0+460	EX	11,20	2,568	2,600	98,8
0+520	BD	10,10	2,568	2,600	98,8
0+580	EX	10,80	2,545	2,600	97,9
0+640	BE	10,50	2,566	2,600	98,7
Análise Estatística					
Média		10,60	2,563		98,6
n					6
s					0,51
k					1,41
Valor máximo					99,3
Valor mínimo					97,9

Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.43 - Espessura e grau de compactação da 3ª camada. Segmento 04

Localização		Espessura Média (cm)	Massa Específica Aparente (g/cm³)		G.C(%)
Estaca (km)	Lado		Pista	Projeto	
0+340	EX	5,70	2,562	2,600	98,5
0+400	BE	5,40	2,549	2,600	98,0
0+460	EX	5,60	2,588	2,600	99,5
0+520	BD	5,30	2,569	2,600	98,8
0+580	EX	5,70	2,592	2,600	99,7
0+640	BE	5,90	2,592	2,600	99,7
Análise Estatística					
Média		5,60	2,575		98,9
n					6
s					0,69
k					1,41
Valor máximo					99,9
Valor mínimo					97,9

Fonte: Autora (2012).

A espessura média do segmento 05 atendeu o projeto. O grau de compactação ficou dentro dos limites aceitáveis, ou seja, entre 97 % e 101% (DNIT 031/3004 ES). A porcentagem de volume de vazios da mistura foi de 5,6%. Os resultados estão mostrados no Quadro 4.44.

Quadro 4.44 - Espessura e grau de compactação da 1ª, 2ª e 3ª camada. Segmento 05

Localização		Espessura Média (cm)	Massa Específica Aparente (g/cm³)		G.C (%)
Estaca (km)	Lado		Pista	Projeto	
1+540	BD	16,10	2,536	2,600	97,5
1+600	EX	15,10	2,555	2,600	98,3
1+660	BE	15,10	2,550	2,600	98,1
1+720	EX	14,50	2,552	2,600	98,2
1+780	BD	16,30	2,577	2,600	99,1
1+840	EX	14,50	2,550	2,600	98,1
Análise Estatística					
Média		15,2	2,553		98,2
n					6,00
s					0,51
k					1,41
Valor máximo					98,9
Valor mínimo					97,5

Fonte: Autora (2012).

Analisando-se de forma geral, principalmente para os segmentos 01, 03 e 04 onde houveram grandes diferenças de espessura em relação ao projeto, é possível identificar que existe falta de controle nessa etapa tão importante da execução do revestimento asfáltico.

Na prática, o que se pode observar durante a execução, foi que esse erro de espessura está bastante relacionado com a operação do equipamento (vibroacabadora). Apesar do controle da mesa ser eletrônico, a desregulagem ocorre facilmente, tendo que ser constantemente ajustada.

4.4.5.2 Controle deflectométrico

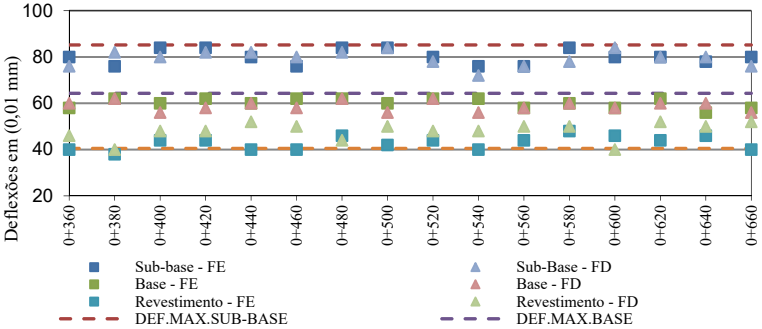
O controle deflectométrico durante a fase de execução foi efetuado com viga Benkelman seguindo as definições da norma DNER-024/94 ME.

As deflexões medidas foram relativamente altas e muitas vezes a deflexão característica ultrapassou a deflexão admissível para a camada (Quadro 3.3). Essa condição deve-se a influência da temperatura na rigidez do revestimento asfáltico. As deflexões levantadas na etapa de execução dos segmentos não foram corrigidas em função da temperatura de execução do ensaio, pois seguiu as diretrizes da norma DNIT. No entanto, sabe-se que pelo período do ano que foram medidas as deflexões (a execução dos segmentos ocorreu entre os meses de outubro de 2012 a março de 2013) podem ter sofrido influência da temperatura.

As medições foram efetuadas em ambas as faixas de tráfego de cada segmento, nas trilhas de roda externas. Os resultados dos

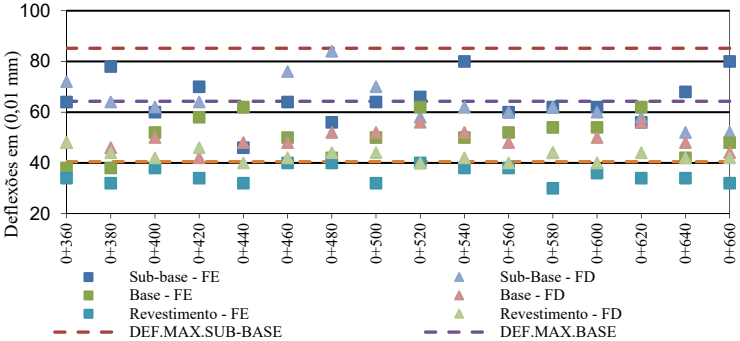
levantamentos deflectométricos estão mostrados nas Figuras a 4.27 a 4.31 e Quadro 4.45.

Figura 4.27 - Deflexões na 3ª camada do revestimento. Segmento 01



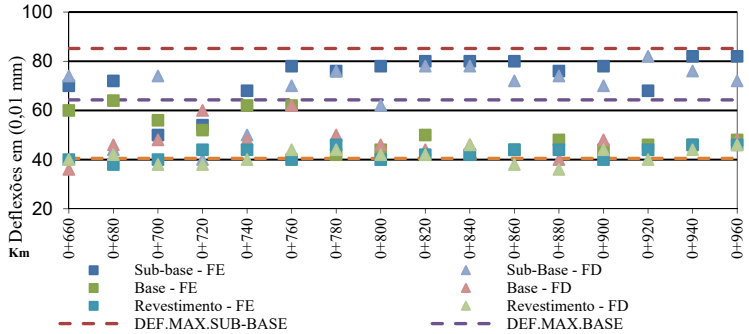
Fonte: Autora (2012).

Figura 4.28 - Deflexões da 3ª camada do revestimento. Segmento 02



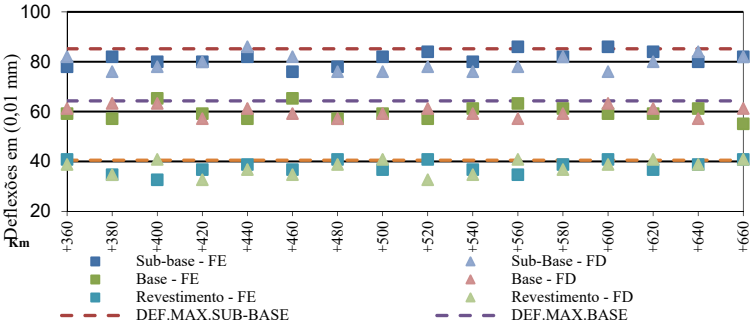
Fonte: Autora (2012).

Figura 4.29 - Deflexões na 3ª camada do revestimento. Segmento 03



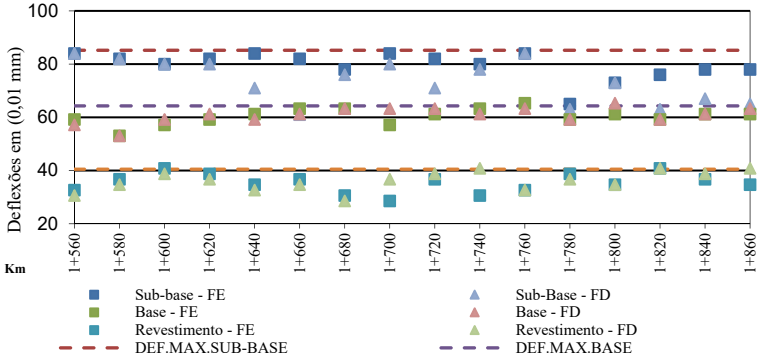
Fonte: Autora (2012).

Figura 4.30 - Deflexões na 3ª camada do revestimento. Segmento 04



Fonte: Autora (2012).

Figura 4.31 - Deflexões na 3ª camada do revestimento. Segmento 05



Fonte: Autora (2012).

Quadro 4.45 - Análise estatística das deflexões na 3ª camada de revestimento

Segmentos	Posição	Média ($x10^{-2}$ mm)	Desv. Pad. ($x10^{-2}$ mm)	C.V (%)	Def. Característica ($x10^{-2}$ mm)
1	FD	48,0	3,8	7,9	51,8
	FE	42,9	2,9	6,8	45,8
2	FD	42,8	2,3	5,4	45,1
	FE	35,3	3,3	9,3	38,6
3	FD	41,5	3,1	7,5	44,6
	FE	42,5	2,6	6,1	45,1
4	FD	37,6	3,0	8,0	40,6
	FE	37,9	2,6	6,9	40,5
5	FD	36,1	3,7	10,2	39,8
	FE	35,3	3,6	10,2	38,9

Fonte: Autora (2012).

4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.5.1 Caracterização da mistura na fase de projeto

As características mecânicas da mistura com ligante convencional foram analisadas, na fase de projeto, a partir de ensaios de módulo dinâmico (ASTM D 3497) e análise da deformação permanente através do índice CDI[3], *Flow Number*[4] e com o simulador de tráfego francês (NF P 98-250-2). A mistura não foi analisada com relação a resistência à fadiga. Os resultados obtidos nos ensaios estão mostrados no Quadro 4.46.

Quadro 4.46 - Características mecânicas da mistura

Módulo dinâmico, MPa		CDI	*Flow Number*, ciclos	Deformação Permanente, %
@ 10 Hz, 25°C	@ 5 Hz, 60°C			
7857	171	107	458	6,9

Fonte: Adaptado de Cenpes (2011).

Com relação aos resultados obtidos são feitas as seguintes observações (CENPES, 2011):

- Os valores de módulo dinâmico da mistura projetada estão compatíveis com misturas executadas com CAP 50/70;

[3] O parâmetro CDI refere-se a área formada na compactação (com o compactador giratório Superpave) que vai do 8º giro até atingir o número de giros necessários para se obter 92% da Gmm (BAHIA e MAHMOUD, 2004, *apud* WARGHA FILHO, 2013).

[4] O *Flow Number* pode ser usado com indicador de desempenho à deformação permanente (WITCZAK, 2005 *apud* NASCIMENTO *et al*., 2015).

- Os valores elevados de CDI e *Flow Number* indicam boa resistência à deformação permanente da mistura, comprovado pelo resultado do ensaio no simulador francês (6,9%). O limite para este ensaio é de 5% para tráfegos pesados e 10% para tráfegos de médio a pesado. Normalmente, valores abaixo de 5% somente são alcançados com o uso de CAPs modificados. Portanto, a partir dos materiais disponíveis para a dosagem, a mistura projetada apresentou resultados satisfatórios.

4.6 ANÁLISE ESTRUTURAL E FUNCIONAL DOS SEGMENTOS MONITORADOS

A análise estrutural e funcional foi efetuada no ano zero, apenas para os segmentos 01, 02 e 03. Esses levantamentos envolveram medidas de deflexão, irregularidade, afundamento de trilha de rodas, atrito e textura.

4.6.1 Avaliação Estrutural

Para a avaliação estrutural dos segmentos foram realizados novos levantamentos de deflexões com a Viga Benkelman em novembro de 2013 (4 meses antes da abertura ao tráfego). Também foram realizados levantamentos com o FWD em março de 2014 (mês de abertura ao tráfego).

Foi realizada a retroanálise para a determinação dos módulos elásticos das camadas dos pavimentos para os seguintes levantamentos:

- Levantamento 01: Na fase de execução (entre outubro e dezembro de 2012), com Viga Benkelman;
- Levantamento 02: Após 1 ano de execução (novembro de 2013) com Viga Benkelman, porém sem atuação do tráfego;
- Levantamento 03: Na abertura do tráfego (março de 2014), com FWD.

4.6.1.1 Módulos das bacias

Os dados de entrada para a retroanálise dos segmentos estão apresentados no Quadro 4.47.

Quadro 4.47 - Informações dos segmentos

Camada	Espessura (cm)			MR (MPa)*			Coef. de Poisson		
Segmento	SM01	SM02	SM03	SM01	SM02	SM03	SM01	SM02	SM03
Revest. (AC)	16,5	18,0	11,0	6763	6763	6763	0,30	0,30	0,30
Revest. (AB)	-	-	6,1	-	-	5859	-	-	0,27
Base (BG)	18,0	18,0	18,0	300	300	300	0,35	0,35	0,35
Sub-base (MS)	20	20	20	250	250	250	0,35	0,35	0,35
Subleito	-	-	-	90	90	90	0,45	0,45	0,45

** módulos semente utilizados na retroanálise*
*** ensaios de laboratório*
Fonte: Autora (2015).

A espessura da camada asfáltica foi aquela obtida através da média dos corpos de prova extraídos com sonda rotativa durante a execução dos segmentos.

Os valores de módulo de resiliência do revestimento asfáltico convencional e da mistura com asfalto-borracha foram determinados em laboratório e se referem aos ensaios com amostras extraídas dos segmentos durante a execução. Para as camadas granulares e do subleito foram utilizados os valores estimados no projeto da rodovia, conforme Quadro 3.3.

Os valores do coeficiente das camadas granulares e do subleito foram os obtidos por Melo (2014). O valor do coeficiente de Poisson para a camada de asfalto-borracha foi o mesmo obtido experimentalmente por Trichês e Santos (2011). Para a camada de revestimento convencional, o valor foi obtido da norma DNIT 135/2010.

4.6.1.2 Critério de convergência

Com o objetivo de estabelecer o melhor ajuste entre as bacias calculadas e medidas foram utilizados como parâmetros matemáticos dois critérios de convergência da retroanálise: a) erro relativo individual de cada medida e; b) raiz média quadrática, expressos através das Equações 4.1 e 4.2.

$$\varepsilon(\%) = \left[\frac{(d_{mi} - d_{cij})}{d_{mi}}\right] x100 \qquad (4.1)$$

$$RMS\% = \sqrt{\frac{\left\{\sum_{i=1}^{n}\left[100x\left(\frac{d_{mi}-d_{cij}}{dmi}\right)\right]^2\right\}}{n}} \quad (4.2)$$

onde:
ε, $RMS\%$ = erros aceitáveis para o ajuste entre as bacias medidas e calculadas;
d_{mi} = deflexão medida no ponto i da bacia medida em campo (i = 1, 2, ..., n, sendo n o número de pontos analisados da bacia de deformação); e
d_{cij} = deflexão calculada no ponto i da j-ésima bacia teórica (i = 1, 2, ..., n, j= 1,2, ..., k, sendo k, o número iterações até ser atingido o erro máximo permitido).

Considerando-se o fato de que, para as leituras mais afastadas do ponto de aplicação da carga, aumenta significativamente a incerteza quanto ao valor da deflexão, foi adotado erro máximo conforme mostrado no Quadro 4.48.

Quadro 4.48 - Erro máximo admissível

Distância do ponto de aplicação da carga	Erro admissível ε (%)
0	10
25	10
50	30
75	30
100	50
125	50
150	50

Fonte: Autora (2016).

Para a raiz média quadrática a tolerância procurou-se buscar um valor máximo de 2%. Os valores obtidos no cálculo extrapolaram esse limite (para as deflexões com a Viga Benkelman). No entanto, esses valores foram tolerados tendo em vista que o critério de erro máximo foi atendido (FERNANDES, 2000).

4.6.1.3 Correção da deflexão em função da temperatura do pavimento

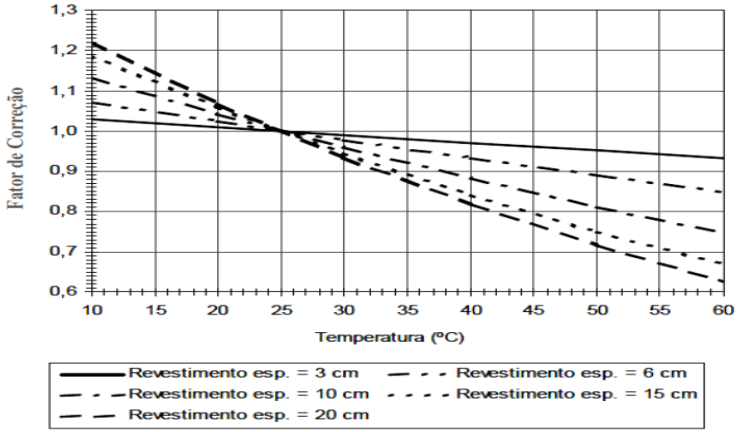
Como as medidas de deflexões são influenciadas pela temperatura do revestimento asfáltico foi necessária a correção destas em função de uma temperatura de referência. Para isso, foram aplicados

os fatores de correção apresentados no gráfico da Figura 4.47 retirado da instrução de projeto P00/003 do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (2006).

No entanto, para os levantamentos efetuados na época da construção do segmentos (levantamento 1) não foram medidas as temperaturas do ar e da superfície da camada asfáltica. Para possibilitar a correção das deflexões obtidas nesses levantamentos foi utilizada a Equação 2.1, que permite encontrar a temperatura em uma dada profundidade da camada com base na temperatura média mensal.

Primeiramente buscou-se a informação a respeito da temperatura média mensal durante a execução dos ensaios, conforme dados climatológicos constantes no Quadro 2.2 e assim definiu-se as temperaturas mensais de acordo com a data de execução de cada segmento. Após o cálculo através da equação citada os valores relativos a temperatura na superfície da camada asfáltica foram utilizados como dado de entrada do ábaco da Figura 4.32 para encontrar o fator de correção das deflexões em função da temperatura do revestimento asfáltico.

Figura 4.32 - Fator de correção da deflexão em função da temperatura do revestimento asfáltico



Fonte: DER/SP (2006)

O Quadro 4.49 apresenta as temperaturas em cada levantamento para os segmentos, bem como, os fatores de correção.

Para as deflexões corrigidas de cada segmento foram efetuadas as retroanálises, sendo determinadas as deflexões médias (Dm) de todos os pontos analisados de cada segmento (16 estacas) e o desvio padrão (σ).

Com isso, obteve-se Dc_{sup}=Dm+σ como intervalo superior e Dc_{inf} =Dm-σ como intervalo inferior das deflexões.

O cálculo da deflexão média foi baseada na norma DNER-PRO 11/79, que define um intervalo de aceitação para valores individuais (D) como sendo, D±zσ (z=2,5, conforme tabela 1 da mesma norma) e assim os valores considerados fora do intervalo foram excluídos do cálculo da média.

Quadro 4.49 - Temperaturas durante os levantamentos

Levantamento 01			
Segmento	Segmento 01 (Dez./2012)	Segmento 02 (Out./2012)	Segmento 03 (Dez./2012)
Temp. ambiente (°C)	27,0	24,0	27,0
Temp. revestimento (°C)	30,2	26,6	30,2
Fator de correção	0,94	0,95	0,93
Levantamento 02			
Segmento	Segmento 01 (Nov./2012)	Segmento 02 (Nov./2012)	Segmento 03 (Nov./2012)
Temp. ambiente (°C)	29,0	28,0	28,0
Temp. revestimento (°C)	34,0	33,0	33,0
Fator de correção	0,92	0,91	0,91
Levantamento 03			
Segmento	Segmento 01 (Março/2014)	Segmento 02 (Março/2014)	Segmento 03 (Março/2014)
Temp. ambiente (°C)	22,1	23,4	23,1
Temp. revestimento (°C)	32,9	36,4	35,8
Fator de correção	0,92	0,86	0,87

Fonte: Autora (2016)

4.6.1.4 Retroanálise para o levantamento 1 (Viga Benkelman)

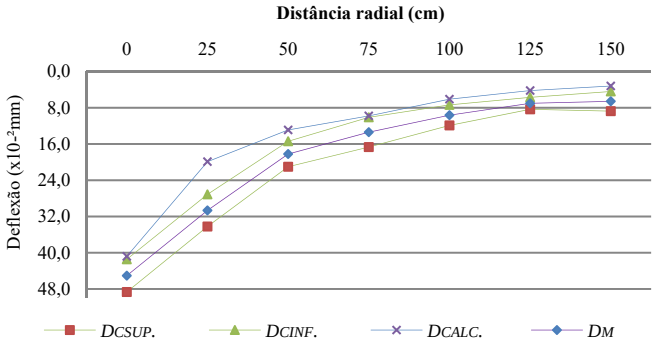
Os Quadros 4.50 a 4.52 apresentam as deflexões médias, deflexões características superiores e inferiores e as deflexões calculadas por retroanálise. Apresenta também os valores do erro relativo (ε) e raiz média quadrática (RMS). As Figuras 4.33 a 4.35 apresentam os gráficos da bacia de deformação dos segmentos.

Quadro 4.50 - Retroanálise das deflexões (Levant.1). SM01

Distâncias (cm)	0,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Dm (x0,01 mm)	45,1	30,7	18,2	13,4	9,6	7,0	6,6
σ (x0,01 mm)	3,6	3,5	2,8	3,3	2,3	1,3	2,2
$Dc_{sup.}$ (x0,01 mm)	48,7	34,2	21,0	16,7	11,9	8,3	8,8
$Dc_{inf.}$ (x0,01 mm)	41,5	27,1	15,4	10,1	7,4	5,7	4,4
$D_{calc.}$ (x0,01 mm)	40,8	19,9	12,9	9,8	6,1	4,2	3,2
ε (%)	9	5	22	16	21	31	16
RMS (%)	8,06						

Fonte: Autora (2015)

Figura 4.33 - Gráfico da bacia de deformação (Levant.1). SM01



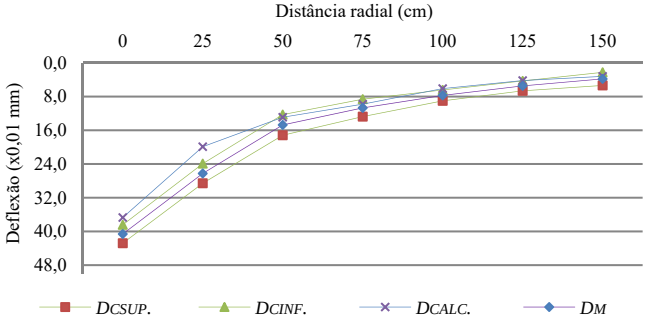
Fonte: Autora (2015)

Quadro 4.51 - Retroanálise das deflexões (Levant.1). SM02

Distâncias (cm)	0,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Dm (x0,01 mm)	40,6	26,2	14,7	10,7	7,7	5,5	3,8
σ (x0,01 mm)	2,2	2,3	2,5	2,1	1,3	1,2	1,6
$Dc_{sup.}$ (x0,01 mm)	42,8	28,6	17,2	12,8	9,0	6,6	5,4
$Dc_{inf.}$ (x0,01 mm)	38,4	23,9	12,3	8,6	6,4	4,3	2,2
$D_{calc.}$ (x0,01 mm)	36,7	19,9	12,9	9,8	6,1	4,2	3,2
ε (%)	10	11	33	24	23	34	55
RMS (%)	7,39						

Fonte: Autora (2015)

Figura 4.34 - Gráfico da bacia de deformação (Levant.1). SM02



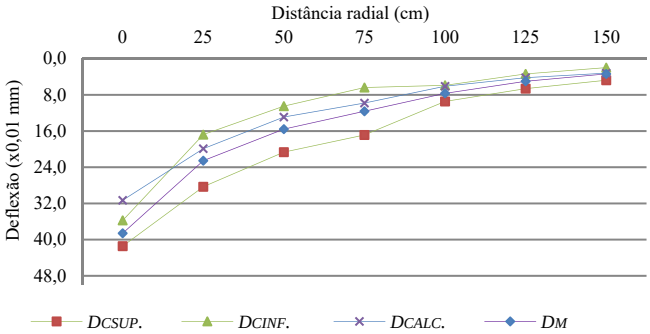
Fonte: Autora (2015)

Quadro 4.52 - Retroanálise das deflexões (Levant.1). SM03

Distâncias (cm)	0,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0	150,0
Dm (x0,01 mm)	38,6	22,6	15,6	11,6	7,7	5,0	3,4
σ (x0,01 mm)	2,8	5,8	5,1	5,2	1,8	1,6	1,4
$Dc_{sup.}$ (x0,01 mm)	41,4	28,3	20,7	16,9	9,5	6,6	4,8
$Dc_{inf.}$ (x0,01 mm)	35,8	16,8	10,5	6,4	5,9	3,4	2,0
$D_{calc.}$ (x0,01 mm)	31,3	19,9	12,9	9,8	6,1	4,2	3,2
ε (%)	19	10	13	11	28	56	93
RMS (%)	13,79						

Fonte: Autora (2015)

Figura 4.35 - Gráfico da bacia de deformação (Levant.1). SM03



Fonte: Autora (2015)

4.6.1.5 Retroanálise para o levantamento 02 (Viga Benkelman – VB)

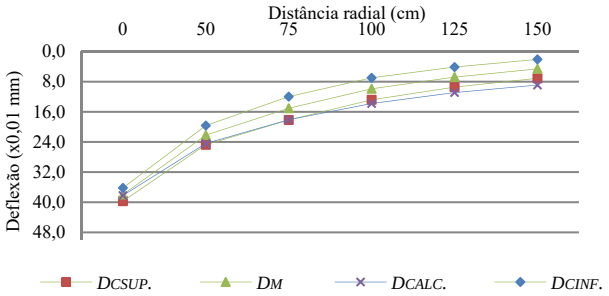
Os Quadros 4.53 a 4.55 apresentam as deflexões médias, deflexões características superiores e inferiores e as deflexões calculadas por retroanálise. Apresenta também os valores do erro relativo (ε) e raiz média quadrática (RMS). As Figuras 4.36 a 4.38 apresentam os gráficos da bacia de deformação dos segmentos.

Quadro 4.53 - Retroanálise das deflexões (Levant.2). SM01

Distâncias (cm)	D_0	D_{20}	D_{45}	D_{60}	D_{90}	D_{120}	D_{150}
Dm (x0,01 mm)	38,0	31,3	22,2	15,1	9,9	6,8	4,6
σ (x0,01 mm)	1,8	1,6	2,6	3,1	2,9	2,7	2,5
$Dc_{sup.}$ (x0,01 mm)	39,7	32,9	24,8	18,2	12,8	9,4	7,1
$Dc_{inf.}$ (x0,01 mm)	36,2	29,6	19,6	12,0	7,0	4,1	2,1
$D_{calc.}$ (x0,01 mm)	38,2	32,5	24,4	18,1	13,8	10,9	8,9
ε (%)	0,7	3,9	9,9	20,1	39,5	60,6	93,5
RMS (%)	12,52						

Fonte: Autora (2015)

Figura 4.36 - Gráfico da bacia de deformação (Levant.2). SM01



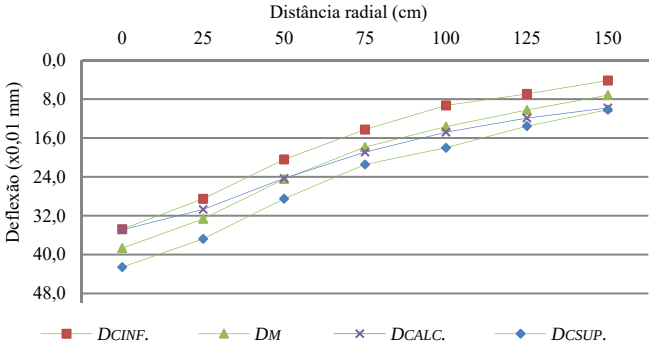
Fonte: Autora (2015)

Quadro 4.54 - Retroanálise das deflexões (Levant.2). SM02

Distâncias (cm)	D_0	D_{20}	D_{45}	D_{60}	D_{90}	D_{120}	D_{150}
Dm (x0,01 mm)	38,7	32,6	24,5	17,9	13,7	10,2	7,2
σ (x0,01 mm)	3,9	4,1	4,0	3,6	4,4	3,3	3,0
$Dc_{sup.}$ (x0,01 mm)	42,6	36,8	28,5	21,5	18,0	13,6	10,2
$Dc_{inf.}$ (x0,01 mm)	34,8	28,5	20,4	14,3	9,3	6,9	4,2
$D_{calc.}$ (x0,01 mm)	34,9	30,7	24,3	18,9	14,8	11,9	9,8
ε (%)	9,8	6,0	0,6	5,8	8,4	16,2	36,8
RMS (%)	10,4						

Fonte: Autora (2015)

Figura 4.37 - Gráfico da bacia de deformação (Levant.2). SM02



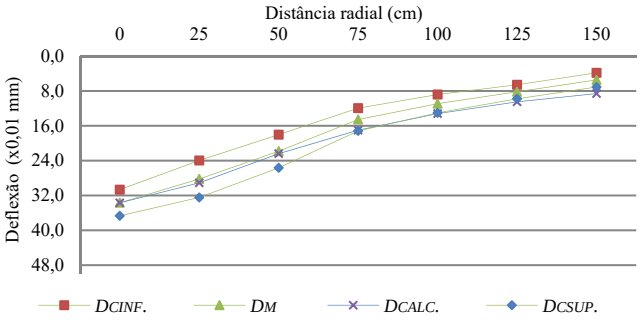
Fonte: Autora (2015)

Quadro 4.55 - Retroanálise das deflexões (Levant.2). SM03

Distâncias (cm)	D_0	D_{20}	D_{45}	D_{60}	D_{90}	D_{120}	D_{150}
Dm (x0,01 mm)	33,7	28,2	21,8	14,6	10,9	8,2	5,5
σ (x0,01 mm)	3,0	4,2	3,8	2,6	2,1	1,6	1,6
$Dc_{sup.}$ (x0,01 mm)	36,7	32,5	25,7	17,2	13,0	9,8	7,1
$Dc_{inf.}$ (x0,01 mm)	30,7	24,0	18,0	11,9	8,8	6,6	3,8
$D_{calc.}$ (x0,01 mm)	33,7	29,1	22,4	17,0	13,2	10,5	8,6
ε (%)	0,1	3,1	2,6	16,8	20,9	28,2	57,5
RMS (%)	10,6						

Fonte: Autora (2015)

Figura 4.38 - Gráfico da bacia de deformação (Levant.2). SM03



Fonte: Autora (2015)

4.6.1.6 Retroanálise para o levantamento 03 (FWD)

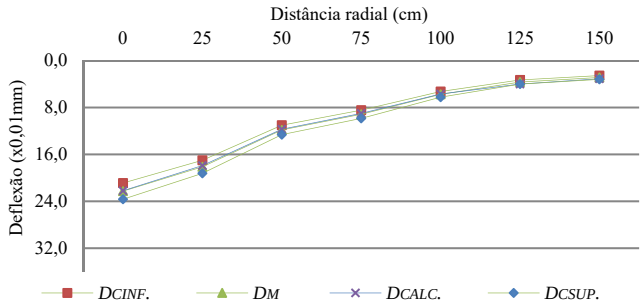
Os Quadros 4.56 a 4.58 apresentam as deflexões médias, deflexões características superiores e inferiores e as deflexões calculadas por retroanálise. Apresenta também os valores do erro relativo (ε) e raiz média quadrática (RMS). As Figuras 4.39 a 4.41 apresentam os gráficos da bacia de deformação dos segmentos.

Quadro 4.56 - Retroanálise das deflexões (Levant.3). SM01

Distâncias (cm)	0,0	20,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0
Dm (x0,01 mm)	22,3	18,1	11,8	9,2	5,8	3,7	2,9
σ (x0,01 mm)	1,4	1,1	0,8	0,7	0,5	0,4	0,3
$Dc_{sup.}$ (x0,01 mm)	23,7	19,2	12,6	9,9	6,2	4,0	3,2
$Dc_{inf.}$ (x0,01 mm)	20,9	17,0	11,0	8,4	5,3	3,3	2,6
$D_{calc.}$ (x0,01 mm)	22,2	17,9	11,7	9,0	5,7	4,0	3,1
ε (%)	0,3	1,2	1,1	1,7	1,0	9,5	7,8
RMS (%)	1,0						

Fonte: Autora (2015)

Figura 4.39 - Gráfico da bacia de deformação (Levant.2). SM01



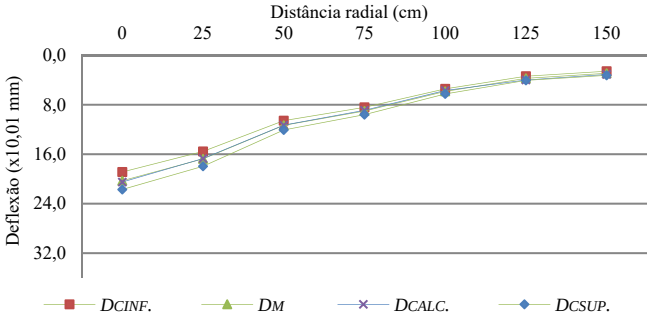
Fonte: Autora (2015)

Quadro 4.57 - Retroanálise das deflexões (Levant.3). SM02

Distâncias (cm)	0,0	20,0	45,0	60,0	90,0	120,0	150,0
Dm (x0,01 mm)	20,3	16,8	11,3	9,0	5,8	3,7	2,9
σ (x0,01 mm)	1,4	1,2	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3
$Dc_{sup.}$ (x0,01 mm)	21,7	18,0	12,1	9,6	6,3	4,1	3,2
$Dc_{inf.}$ (x0,01 mm)	18,9	15,6	10,6	8,4	5,4	3,4	2,6
$D_{calc.}$ (x0,01 mm)	20,5	16,7	11,3	8,9	5,7	4,0	3,1
ε (%)	1,0	0,3	0,3	1,2	2,4	7,4	6,4
RMS (%)	0,8						

Fonte: Autora (2015)

Figura 4.40 - Gráfico da bacia de deformação (Levant.2). SM02



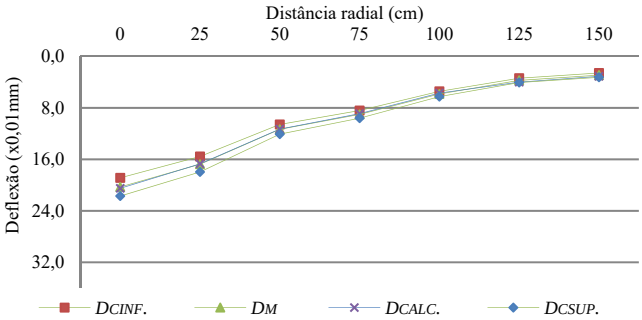
Fonte: Autora (2015)

Quadro 4.58 - Retroanálise das deflexões (Levant.3). SM03

Distâncias (cm)	D_0	D_{20}	D_{45}	D_{60}	D_{90}	D_{120}	D_{150}
Dm (x0,01 mm)	22,3	18,5	12,4	9,9	6,2	3,8	3,1
σ (x0,01 mm)	1,2	1,1	1,0	0,8	0,6	0,3	0,2
$Dc_{sup.}$ (x0,01 mm)	23,5	19,6	13,4	10,7	6,8	4,2	3,3
$Dc_{inf.}$ (x0,01 mm)	21,1	17,4	11,5	9,1	5,7	3,5	2,8
$D_{calc.}$ (x0,01 mm)	22,5	18,4	12,3	9,6	6,1	4,2	3,2
ε (%)	0,9	0,4	1,1	3,1	2,3	9,3	4,2
RMS (%)	1,1						

Fonte: Autora (2015

Figura 4.41 - Gráfico da bacia de deformação (Levant.2). SM03



Fonte: Autora (2015)

O ajuste entre as bacias calculadas e as bacias medidas pode ser considerado bom, tendo em vista os baixos valores de erro relativo e raiz

média quadrática. O Quadro 4.59 apresenta os módulos obtidos em cada levantamento.

Quadro 4.59 - Módulos obtidos por retroanálise das deflexões

Segmentos	Camada	Esp. (cm)	Coef. Poisson	Levant.01 MR (MPa)	Levant.02 MR (kgf/cm²)	Levant.03 MR (Mpa)
SM01	Revest.	16,5	0,30	2100	4300	5181
	Base	18	0.35	140	120	197
	Sub base	20	0.35	120	115	187
	Subleito	-	0,35	99	86	237
SM02	Revest.	18	0,30	2200	5200	5233
	Base	18	0.35	110	130	199
	Sub base	20	0.35	100	120	190
	Subleito	-	0,35	150	80	239
SM03	Revest. AC	11	0,30	210	5600	5796
	Revest. AB	6,1	0,27	210	4600	4695
	Base	18	0,35	280	150	212
	Sub base	20	0,35	150	120	131
	Subleito	-	0,35	118	90	230

Fonte: Autora (2015)

Os módulos obtidos para os levantamentos durante a execução dos segmentos (levantamento 01) foram muito baixos, esse fato deve-se a época de execução dos segmentos, entre os meses de outubro e dezembro, que fazem parte dos meses com maior temperatura do ano. Outro fato importante foi que na época desses levantamentos não houve medição da temperatura ambiente e nem da camada de revestimento. Para a correção das temperaturas foi utilizado como parâmetro a média das temperaturas máximas para os meses que foram feitos os levantamentos. Nesse caso, a correção efetuada pode não expressar a realidade e ocorrer em erros na determinação da deflexão corrigida.

Todavia, ainda que os módulos possam ser maiores em razão da temperatura, ainda ficam inferiores aos obtidos nos levantamentos seguintes. Essa condição é decorrente, exclusivamente, do envelhecimento da mistura asfáltica, uma vez que todos os levantamentos foram efetuados antes da abertura ao tráfego.

Com relação aos módulos obtidos nos levantamentos 2 e 3 nota-se que possuem boa semelhança, principalmente para a camada de revestimento. Cabe ressaltar que esses dois levantamentos foram feitos com um intervalo de apenas 4 meses entre eles, dessa forma, as características dos materiais, em termos de módulo, estão bem próximas nos dois levantamentos, com exceção do subleito.

Como no levantamento 02 houve a verificação das temperaturas do ar e da camada asfáltica foi possível, durante a retroanálise, reduzir a diferença encontrada entre as deflexões de campo e as calculadas para os pontos D0 (0 cm) e D1 (25 cm). Com isso o valor do erro foi menor para esses locais. No entanto, o valor do módulo das camadas do subleito foram bem menores em comparação com os obtidos com o FWD no levantamento 03. O ajuste feito levando em consideração a diminuição do erro nas primeiras leituras (D0 e D1, D2) pode ser explicado pelo fato de que para pontos mais afastados (D6, D7) do ponto de aplicação da carga aumenta muito a incerteza quanto o valor das deflexões levantadas, quando utiliza-se a Viga Benkelman.

Em comparação com os módulos obtidos a partir de ensaios com os corpos de prova extraídos dos segmentos, na época da execução, verifica-se que, tanto para a mistura com asfalto convencional quanto para a mistura com asfalto-borracha, os módulos obtidos foram muito superiores ao obtidos por retroanálise. O Quadro 4.60 mostra o intervalo de módulo resiliente das misturas asfálticas extraídas de campo.

Quadro 4.60 - Módulo obtidos através de ensaios

Mistura asfáltica	Módulo Resiliente obtido no ensaio (MPa	Módulo Resiliente obtido por retroanálise (MPa))
Convencional	6763	5233
Borracha	5839	4695

Fonte: Autora (2015)

O fato desses ensaios de módulo resiliente terem sido feitos apenas em março de 2015, ou seja, 12 meses após a execução do levantamento 03 e cerca de 27 meses após as extrações da pista, pode ter contribuído para o aumento do valor do módulo. Apesar desses corpos de prova terem permanecidos ao abrigo da luz o envelhecimento oxidativo da mistura asfáltica fez com que houvesse um enrijecimento e o consequente aumento do valor da resistência a tração e do módulo resiliente das misturas.

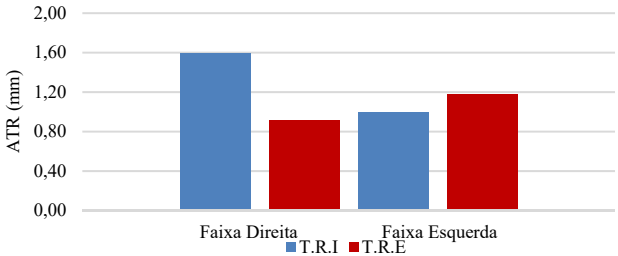
4.6.2 Avaliação Funcional

4.6.2.1 Levantamento de defeitos

As Figuras 4.42 a 4.44 mostram os resultados dos levantamentos de afundamento em trilha de rodas realizados com o Perfilômetro à *laser*

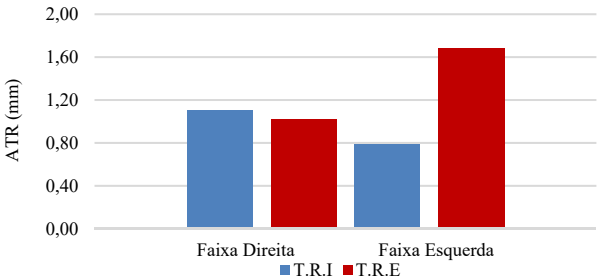
para o ano zero. As medições foram efetuadas em ambas as faixas de tráfego (faixa direita e faixa esquerda) sendo que em cada faixa as leituras foram efetuadas nas trilhas interna (T.R.I) e externa (T.R.E). Os valores mostrados nos se referem ao valor médio dos afundamentos de trilha de roda.

Figura 4.42 - Afundamento de trilha de roda no segmento monitorado 01



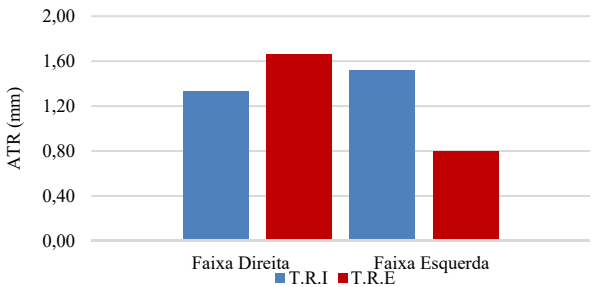
Fonte: Autora (2015)

Figura 4.43 - Afundamento de trilha de roda no segmento monitorado 02



Fonte: Autora (2015)

Figura 4.44 - Afundamento de trilha de roda no segmento monitorado 03



Fonte: Autora (2015)

Os valores de afundamento em trilha de rodas são similares entre os segmentos e tiveram valores máximos de 1,6 mm. Como não havia tráfego na rodovia na época da avaliação, os valores encontrados representam defeitos inerentes à execução. O valor do desvio padrão caracteriza uma baixa variabilidade dos resultados, o que é bastante comum quando se utiliza o Perfilômetro.

4.6.2.2 Irregularidade longitudinal (IRI)

Os Quadros 4.61 a 4.63 mostram os resultados dos levantamentos de irregularidade longitudinal realizado com o equipamento Perfilômetro à *laser*. As medições foram efetuadas para as faixas de tráfego esquerda e direita. Os valores apresentados IRI (m/km) e QI (contagens/km) se referem a média das leituras dos três sensores utilizados no equipamento.

Quadro 4.61 - Levantamento de irregularidade longitudinal no segmento 01

Estaca (km)	Faixa Direita		Faixa Esquerda	
	QI Médio (cont./km)	IRI Médio (m/km)	QI Médio (cont./km)	IRI Médio (m/km)
0 + 360	12,0	1,23	15,5	1,74
0 + 380	8,3	1,11	5,1	0,81
0 + 400	19,7	2,49	17,8	1,80
0 + 420	10,8	1,20	2,5	1,11
0 + 440	2,6	0,99	7,0	1,18
0 + 460	6,6	1,11	9,3	1,17
0 + 480	11,1	1,69	16,4	1,64
0 + 500	6,9	1,52	8,5	1,08
0 + 520	15,7	1,82	1,2	0,71
0 + 540	4,8	1,03	3,5	1,15
0 + 560	1,8	0,81	2,6	0,90
0 + 580	24,5	2,54	9,0	1,14
0 + 600	9,8	1,20	6,4	0,98
0 + 620	17,8	2,20	19,2	2,36
0 + 640	7,7	1,08	5,4	1,26
0 + 660	35,1	3,18	64,3	4,08
Análise Estatística				
Média	12,20	1,58	12,11	1,44
Desvio padrão	8,70	0,69	15,05	0,82

Fonte: Autora (2015)

Quadro 4.62 - Levantamento de irregularidade longitudinal no segmento 02

Estaca (km)	Faixa Direita		Faixa Esquerda	
	QI médio (cont./km)	IRI médio (m/km)	QI médio(cont./km)	IRI Médio (m/km)
0 + 660	35,1	3,18	64,3	4,08
0 + 680	32,3	2,40	11,0	1,49
0 + 700	5,7	1,53	11,5	2,64
0 + 720	3,3	0,80	6,0	1,76
0 + 740	19,0	1,84	19,7	1,73
0 + 760	11,6	1,59	1,0	0,88
0 + 780	18,8	1,94	14,5	1,83
0 + 800	5,1	0,90	10,0	1,94
0 + 820	15,7	2,17	10,2	1,44
0 + 840	10,5	1,37	6,8	1,27
0 + 860	9,6	1,25	7,9	1,31
0 + 880	22,6	2,20	7,2	1,64
0 + 900	15,8	1,93	17,8	1,86
0 + 920	7,4	1,25	20,1	2,02
0 + 940	14,7	1,93	31,7	3,86
0 + 960	8,3	1,60	25,4	2,35
Análise Estatística				
Média	14,72	1,74	16,57	2,01
Desvio padrão	9,22	0,60	14,98	0,87

Fonte: Autora (2015)

Quadro 4.63 - Levantamento de irregularidade longitudinal no segmento 03

Estaca (km)	Faixa Direita		Faixa Esquerda	
	QI Médio(cont./km)	IRI Médio (m/km)	QI Médio(cont./km)	IRI Médio (m/km)
0 + 960	3,6	0,82	-	
0 + 940	7,3	1,36	0,8	0,87
0 + 920	5,2	1,00	14,6	1,92
0 + 900	12,7	1,80	5,6	1,29
0 + 880	3,9	1,06	21,4	2,07
0 + 860	8,3	1,73	5,3	1,33
0 + 840	24,7	3,01	14	1,80
0 + 820	4,6	0,70	2,1	1,25
0 + 800	13,1	1,29	10,7	1,62
0 + 780	13,1	1,54	4,6	1,27
0 + 760	11	2,01	22	2,73
0 + 740	1,8	0,88	9,4	1,56
0 + 720	3,5	1,23	15,2	1,84
0 + 700	10,3	1,29	4,7	1,01
0 + 680	11,4	1,41	16,4	2,66
0 + 660	14,7	1,65	14,8	1,87
Análise Estatística				
Média	9,33	1,42	10,77	1,67
Desvio padrão	5,83	0,56	6,76	0,54

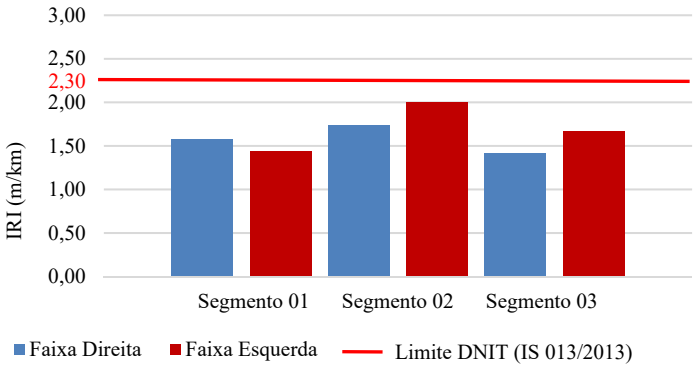
Fonte: Autora (2015)

Como o IRI é um índice mais utilizado em avaliações de pavimentos na maioria dos países, as análises foram feitas com base nesse índice. Como se tratam de pavimentos novos, sem tráfego, os valores obtidos estão todos abaixo do limite de 2,69 m/km estabelecido pela ARTESP, acima do qual já seriam necessárias intervenções nos pavimentos.

Com relação aos conceitos atribuídos pelo DNIT, pelos valores obtidos de IRI e QI é possível indicar que os pavimentos possuem uma condição superficial que vai de boa a excelente. Cabe ressaltar que para ser classificado com um pavimento com condição superficial boa ou excelente é necessário ter um IRI menor 2,7 m/km, valores acima desse limite já tornam o pavimento com condições regulares de conservação, havendo também, em tese, necessidade de intervenções.

A Figura 4.45 mostra a variação do IRI nos segmentos para ambas as faixas de tráfego.

Figura 4.45 - IRI médio dos segmentos monitorados



Fonte: Autora (2015)

Destaca-se no gráfico, o índice de irregularidade exigido pelo DNIT para a entrega de obras novas. Em 2013 o DNIT baixou uma Instrução de Serviço com base no Acórdão nº 328/2013 do TCU fixando algumas exigências quanto a entrega de obras rodoviárias novas ou restauradas.

O documento padroniza os procedimentos para a verificação das condições estruturais e funcionais dos pavimentos antes da entrega das obras e estabelece os limites para aceitação. Para o parâmetro de irregularidade, o DNIT especifica um IRI de 2,3 m/km para pavimentos

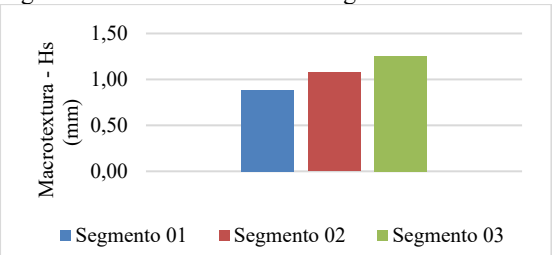
novos. Todavia, os levantamentos exigidos nessa Instrução de Serviço só passaram a ser exigidos para os contratos firmados após a data de publicação da Instrução (novembro de 2013). Nas obras de duplicação da rodovia BR-101, nos lotes contratados anteriormente a essa data, não foram efetuados os levantamentos antes da entrega da obra. No entanto, com relação ao IRI, em todos os segmentos os valores se situaram abaixo desse limite.

Dos segmentos monitorados, o segmento 02 foi o que apresentou maior valor de irregularidade longitudinal, tendo sido verificado valores maiores para a faixa esquerda.

4.6.2.3 Avaliação da textura e do atrito dos pavimentos

A textura e o atrito necessários para o estabelecimento das condições de aderência pneu-pavimento, foram avaliados através dos parâmetros de macrotextura pelo método da Mancha de Areia e da microtextura através do ensaio com o Pêndulo Britânico e *Grip Tester*. Os ensaios foram efetuados na faixa direita (faixa mais carregada) de cada segmento e para o *Grip Tester*, em ambas as faixas. O gráfico da Figura 4.46 apresenta a média dos valores de macrotextura obtidos para os segmentos.

Figura 4.46 - Macrotextura dos segmentos



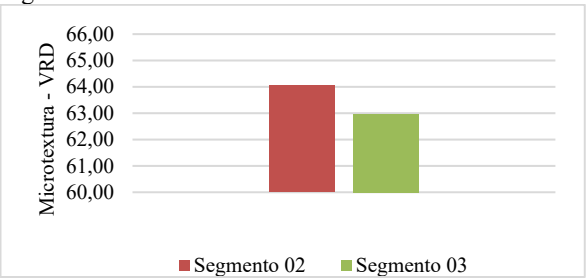
Fonte: Adaptado de FERREIRA (2015).

O DNIT sugere que os pavimentos possuam uma textura superficial classificada entre média à grosseira. Com isso, os valores de Hs devem situar-se entre 0,6 mm a 1,2 mm. Conforme pode ser visto, a macrotextura dos segmentos, em geral, atende os limites sugeridos pelo órgão.

A textura superficial dos segmentos 01 e 02 classifica-se como grosseira ou aberta (Hs entre 0,5 a 1,2 mm) e do segmento 03 como muito grosseira ou aberta (Hs maior do 1,2 mm). Essa condição facilita

o escoamento de água da superfície do revestimento acarretando em maior segurança ao tráfego. A Figura 4.47 mostra os resultados médios de atrito obtidos no ensaio com o Pêndulo Britânico e a Figura 4.48 os resultados médios de atrito com base nos levantamento com o *Grip Tester*.

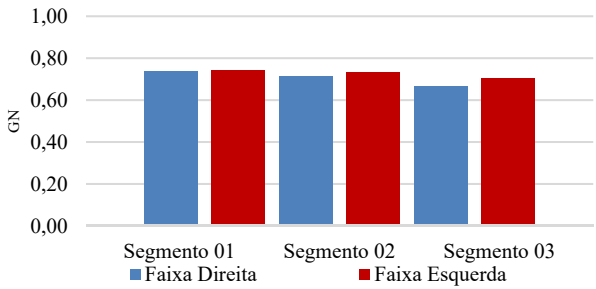
Figura 4.47 - Resultados dos levantamentos de atrito com o Pêndulo Britânico



Fonte: Adaptado de FERREIRA (2015).

Para a microtextura dos pavimentos, o DNIT sugere que os pavimentos possuam uma superfície medianamente rugosa ou rugosa. Para isso, devem possui um VRD (valor de resistência à derrapagem) maior ou igual a 45 de acordo com o DNIT (BRASIL, 2006). Na análise dos resultados é possível classificar os pavimentos (foram analisados apenas os segmentos 02 e 03) como tendo superfície rugosa, ou seja, VRD entre 55 a 75.

Figura 4.48 - Resultados dos levantamentos de atrito com o *Grip Tester*



Fonte: Autora (2015)

A classificação dos pavimentos em termos de microtextura para os resultados obtidos com o *Grip Tester* não é possível tendo em vista que as normas do DNIT levam em consideração apenas os resultados

obtidos com o Pêndulo Britânico, mas de acordo com as diretrizes da ANAC, conforme citado por Ferreira (2015), os resultados obtidos foram superiores aos níveis exigidos para a manutenção dos aeródromos.

Com relação às medidas de atrito realizadas com o *Grip Tester* em comparação com os ensaios com o Pêndulo Britânico foi visto que esse último deve ser utilizado com cautela, visto que na mesma estação de ensaio pode haver superfícies com diferentes aspectos, principalmente decorrentes da segregação da mistura, que não devem ser analisados por não representarem a superfície em sua totalidade (FERREIRA, 2015).

A partir dos resultados obtidos de textura através do ensaio de Mancha de Areia e de atrito através dos ensaios de Pêndulo Britânico e *Grip Tester* foi calculado o IFI para cada segmento. De acordo com os resultados, todos os segmentos receberam a classificação "ótimo", conforme Aps (2006), ou seja, tiveram valor de atrito (F60) superior a 0,35, tanto para os resultados do ensaios com o Pêndulo Britânico como para o *Grip Tester*. Os Quadros 4.64 e 4.65 mostram os resultados obtidos.

Quadro 4.64 - Valores de IFI - Pêndulo Britânico

Segmentos	IFI - Faixa Direita	
	Sp	F(60)
SM-02	109,989	0,37
SM-03	131,579	0,38

Fonte: Autora (2015)

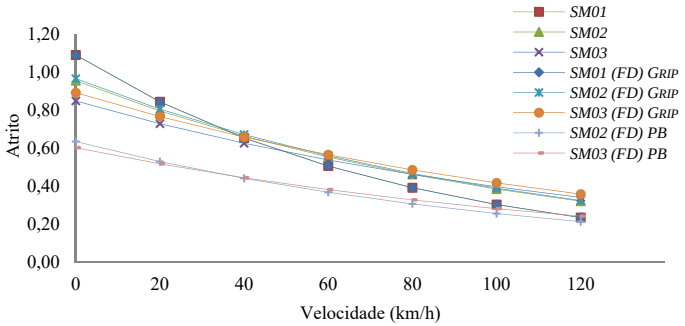
Quadro 4.65 - Valores de IFI - *Grip Tester*

Segmentos	IFI - Faixa Esquerda		IFI - Faixa Direita	
	Sp	F(60)	Sp	F(60)
SM-01	78,172	0,51	78,172	0,51
SM-02	109,989	0,55	109,989	0,56
SM-03	131,579	0,54	131,579	0,57

Fonte: Autora (2015)

Conhecido o valor do IFI é possível traçar a curva de referência estimada para o valor de atrito em função da velocidade de deslocamento como pode ser visto na Figura 4.49. Os valores plotados se referem apenas a faixa direita dos segmentos 02 e 03 para o levantamento com o Pêndulo Britânico (PB) e em ambas as faixas para os levantamentos com o *Grip Tester* nos segmentos 01, 02 e 03.

Figura 4.49 - Curvas de referências para os segmentos



Fonte: Autora (2015)

Com relação ao atrito calculado através dos resultados do Pêndulo Britânico, mostra uma situação mais desfavorável à superfície do pavimento. Cabe ressaltar, conforme citado por Ferreira (2015), que os resultados com o Pêndulo Britânico caracterizam a situação pontual dos pavimentos, sendo que em cada estação de ensaio pode haver diferenças grandes de textura do material devido a segregação da mistura. Já o *Grip Tester*, por fazer uma análise contínua do pavimento, possibilita a obtenção de um valor médio por metro, traduzindo em uma melhor caracterização da superfície.

Com base no gráfico, baseando-se nos resultados alcançados com o *Grip Tester*, é possível identificar que as superfícies dos segmentos 02 e 03 possuem maior valor de atrito para a velocidade de operação da via, que é de 110 km/h (para veículos de passeio) em comparação com o segmento 01. Todavia, os valores alcançados permitem concluir que todos os segmentos possuem condições adequadas de aderência para o início da vida útil.

4.6.3 Caracterização da mistura na fase de execução e pós-execução

4.6.3.1 Ensaio de resistência à tração e módulo de resiliência

Os ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência foram realizados em amostras moldadas através do Marshall (75 golpes) durante a construção dos segmentos e também para as amostras extraídas da pista com sonda rotativa no mesmo período.

A determinação do módulo de resiliência seguiu a metodologia do DNIT 135/2010.

Para os corpos de prova (CPs) moldados em laboratório foram ensaiados os CPs referentes a terceira camada do segmento 02, em mistura convencional. O Quadro 4.66 mostra os resultados obtidos.

Quadro 4.66 - Resultados do ensaio de resistência à tração e módulo de resiliência para os corpos de prova moldados em laboratório para a mistura convencional

Corpo de Prova	MEA (g/cm³)	RT (MPa)	MR (MPa)	Sd (MPa)	MR* (MPa)	Sd * (MPa)
CP 5	2,601	1,79	11504	183	11307	737
CP 6	2,622	2,20	12394	173		
CP 7	2,626	1,64	10718	54		
CP10	2,620	1,74	10613	114		

Fonte: Autora (2015).

Para os corpos de prova extraídos da pista durante a etapa de execução dos segmentos foram ensaiados os CPs referentes a primeira camada do segmento 02, em mistura convencional e para a primeira camada do segmento 03, mistura com asfalto-borracha. Os Quadros 4.67 e Quadro 4.68 mostram os resultados obtidos.

Quadro 4.67 - Resultados do ensaio de resistência à tração e módulo de resiliência para os corpos de prova extraídos da pista para a mistura convencional (Segmento 02)

Corpo de Prova	MEA (g/cm³)	RT (MPa)	MR (MPa)	Sd (MPa)	MR* (MPa)	Sd * (MPa)
1ª CAM CONV. 0+720 BD Nº3	2,520	1,05	7353	37	6763	823
1ª CAM CONV. 0+740 BE Nº 6	2,501	0,91	5856	91		
1ª CAM CONV. 0+760 BD Nº7	2,518	1,18	7461	207		
1ª CAM CONV. 0+900 BD Nº21	2,570	1,01	6368	163		
1ª CAM CONV. 0+940 BD Nº 25	2,603	1,41	8222	145		
1ª CAM CONV. 0+980 BD Nº30	2,531	0,81	6425	117		
1ª CAM CONV. 0+660 BE Nº32	2,510	1,12	6728	82		
1ª CAM CONV. 0+680 BE Nº 34	2,494	0,77	5692	190		

Fonte: Autora (2015).

Quadro 4.68 - Resultados do ensaio de resistência à tração e módulo de resiliência para os corpos de prova extraídos da pista para a mistura com asfalto-borracha (Segmento 03)

Corpo de Prova	MEA (g/cm³)	RT (MPa)	MR (MPa)	Sd (MPa)	MR* (MPa)	Sd * (MPa)
1ª CAM BORR. BE 0+780 Nº13	2,544	1,27	6107	73	5839	433
1ª CAM BORR. BD 0+840 Nº20	2,540	1,25	5842	134		
1ª CAM BORR. BE 0+860 Nº21	2,539	1,25	5964	86		
1ª CAM BORR. BE 0+920 Nº27	2,566	1,53	6237	106		
1ª CAM BORR. BD 0+960 Nº32	2,534	1,22	5044	53		

Fonte: Autora (2015).

Os valores de resistência à tração, tanto para os corpos de prova moldados em laboratório quanto para os corpos de prova extraídos da pista são superiores ao valor mínimo estabelecido na norma DNIT 031/2006, que é de 0,65 MPa.

Os valores de módulo de resiliência dos corpos de prova extraídos com sonda rotativa na época da construção, e, portanto, com a mesma idade dos corpos de prova moldados em laboratório, são bem menores. Apesar disso, estão mais compatíveis com o enrijecimento da mistura a logo prazo do que os valores obtidos em laboratório.Também apresentam relação mais próxima como os valores obtidos por retroanálise apresentados no Quadro 4.69.

4.6.3.2 Dano por umidade induzida

Fo determinado o dano por umidade induzida para os corpos de prova moldados em laboratório (com 7% de vazios) e para os corpos de prova extraídos da pista (ambos na época de execução dos segmentos) tanto para a mistura com asfalto convencional como para a mistura com asfalto-borracha.

Para os corpos de prova moldados em laboratório da mistura convencional foram utilizados os CPs referentes a terceira camada do segmento 02. O Quadro 4.69 apresenta os resultados obtidos.

Quadro 4.69 - Resultados do ensaio de dano por umidade induzida para os corpos de prova moldados em laboratório da mistura convencional

Condição	Corpo de prova	MEA (g/cm³)	RT (MPa)	RT média	RTU
Sem condicionar	CP 2	2,602	1,75	1,75	0,98
	CP 4	2,595	1,44		
	CP 9	2,607	2,05		
Condicionado	CP 1	2,611	1,62	1,70	
	CP 3	2,622	1,61		
	CP6	2,623	1,88		

Fonte: Autora (2015).

Para os corpos de prova extraídos da pista da mistura convencional foram utilizados os CPs referentes a primeira camada do segmento 02. Foram também ensaiados os CPs extraídos da primeira camada do Segmento 03, com mistura em asfalto-borracha. O Quadro 4.70 e 4.71 apresentam os resultados obtidos.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que tanto a mistura convencional quanto a mistura com asfalto-borracha possuem desempenho satisfatório com relação a resistência a ação da água. O dano máximo provocado foi de 9% para os CPs extraídos de campo, ou seja, distante do máximo previsto em norma que é de 30%.

Quadro 4.70 - Resultados do ensaio de dano por umidade induzida para os corpos de prova extraídos da pista da mistura convencional

Condição	Corpo de prova	MEAS (g/cm³)	RT (MPa)	RT média	RTU
Sem condicionar	1ª CAM CONV. 0+700 BE Nº2	2,555	1,01	0,86	0,91
	1ª CAM CONV. 0+800 BD Nº11	2,504	0,89		
	1ª CAM CONV. 0+840 BE Nº 16	2,538	0,74		
	1ª CAM CONV. 0+860 BD Nº17	2,530	0,97		
	1ª CAM CONV. 0+980 BE Nº31	2,542	0,71		
Condicionado	1ª CAM CONV. 0+780 BD Nº9	2,554	0,64	0,78	
	1ª CAM CONV. 0+860 BE Nº 18	2,527	0,69		
	1ª CAM CONV. 0+960 BE Nº28	2,543	0,78		
	1ª CAM CONV. 0+980 BD Nº29	2,503	1,00		
	1ª CAM CONV. 0+680 BD Nº 35	2,543	0,81		

Fonte: Autora (2015).

Quadro 4.71 - Resultados do ensaio de dano por umidade induzida para os corpos de prova extraídos da pista da mistura com asfalto-borracha

Condição	Corpo de prova	MEAS (g/cm³)	RT (MPa)	RT média	RTU
Sem condicionar	1ª CAM BORR. BD 0+740 Nº10	2,553	1,31	1,17	0,91
	1ª CAM BORR. BD 0+820 Nº18	2,557	1,36		
	1ª CAM BORR. BE 0+840 Nº19	2,547	0,88		
	1ª CAM BORR. BE 0+940 Nº29	2,562	1,14		
	1ª CAM BORR. BD 0+980 Nº34	2,529	1,17		
Condicionado	1ª CAM BORR. BE 0+740 Nº9	2,563	1,15	1,06	
	1ª CAM BORR. BE 0+820 Nº17	2,545	1,13		
	1ª CAM BORR. BD 0+860 Nº22	2,536	0,98		
	1ª CAM BORR. BD 0+880 Nº24	2,547	1,03		
	1ª CAM BORR. BE 0+960 Nº31	2,550	1,04		

Fonte: Autora (2015).

4.6.3.3 Ensaios de Resistência à Fadiga

Foram ensaiados os dois tipos de misturas: com ligante convencional 50/70 e com asfalto-borracha ECOFLEX B (fornecido

pela Greca Asfaltos). Para cada uma das misturas foram ensaiados corpos de provas obtidos de placas moldadas em laboratório e de placas extraídas de campo durante a construção dos segmentos monitorados, resultando desta forma 4 combinações de condição de ensaio.

Para a definição da temperatura em que seriam realizados os ensaios de fadiga das misturas asfálticas, inicialmente se fez um estudo do comportamento reológico das misturas asfálticas convencional e com asfalto-borracha tanto em corpos de prova moldados em laboratório como em corpos de prova serrados a partir de placas extraídas dos segmentos, avaliando-se o módulo complexo sob diferentes temperaturas e frequências de carregamento.

Para caracterização do comportamento reológico das misturas de concreto asfáltico produzidas foi conduzido o ensaio de módulo complexo a diversas frequências e temperaturas de teste. O ensaio seguiu as diretrizes da norma europeia EN 12697-26 - *Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 26: Stiffness*. O ensaio foi conduzido sob carregamento sinusoidal contínuo e deformação controlada (50 µm/m) empregando-se o equipamento de fadiga a 4 pontos. O Quadro 4.72 mostra as características físicas dos corpos de prova ensaiados.

Quadro 4.72 - Características físicas e volumétricas dos corpos de prova ensaiados para avaliação do comportamento reológico das misturas

Mistura	Identificação do CP	Gmb (g/cm^3)	Vv (%)
Convencional	Segmento 02 - segunda camada. Estaca 0+900	2,556	5,49
	Moldado em laboratório	2,566	5,15
Asfalto-borracha	Segmento 03 - primeira camada. Estaca 0+760	2,526	5,10
	Moldado em laboratório	2,514	5,42

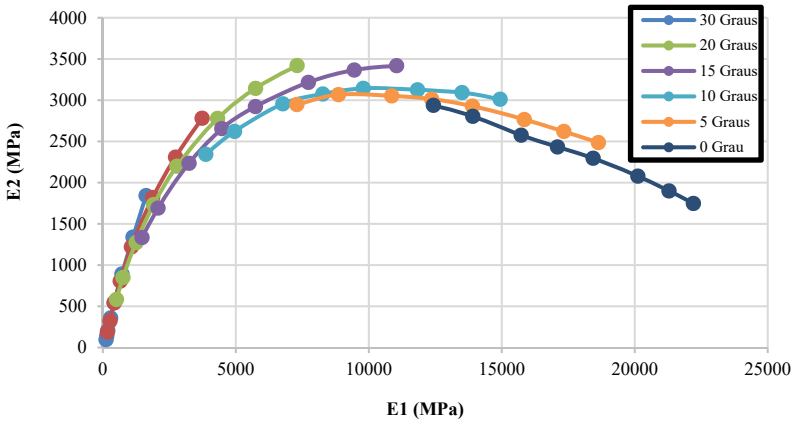
Os Quadros de 4.73 a 4.76 mostram os resultados obtidos para cada uma das misturas ensaiadas. A partir dos resultados, foram plotados os planos complexos (Cole-Cole) de cada mistura e definida as temperatura em que cada mistura apresentaria o maior módulo de perda (parte imaginária do módulo complexo onde ocorreria a maior dissipação de energia para cada ciclo de carregamento aplicado na mistura). As Figuras de 4.50 a 4.53 mostra o plano complexo de cada mistura ensaiada.

Quadro 4.73 - Caracterização reológica da mistura asfáltica convencional moldada em laboratório

Módulo Complexo |E*| (MPa)							
Freq.(Hz)	T = 0°C	T = 5°C	T = 10°C	T = 15°C	T = 20°C	T = 25°C	T = 30°C
0,1	12772	7868	4525	1987	776	252	154
0,2	14190	9376	5603	2677	1136	417	201
0,5	15938	11281	7384	3936	1785	693	277
1,	17268	12724	8823	5202	2576	1037	462
2	18577	14202	10285	6438	3549	1625	687
5	20224	16086	12238	8370	5131	2610	1145
10	21373	17531	13854	10035	6546	3578	1754
20	22274	18797	15239	11562	8065	4654	2457
Ângulo de fase δ (°)							
Freq.(Hz)	T = 0°C	T = 5°C	T = 10°C	T = 15°C	T = 20°C	T = 25°C	T = 30°C
0,1	13,3	22,0	31,2	42,2	48,7	47,8	38,7
0,2	11,4	19,1	27,9	39,2	48,4	50,5	43,5
0,5	9,3	15,7	23,6	34,6	45,5	51,8	48,3
1,	8,1	13,7	20,4	30,7	42,3	51,0	50,9
2	7,1	11,9	17,8	27,0	38,3	48,7	52,1
5	5,9	9,9	14,8	22,6	32,8	44,2	51,2
10	5,1	8,6	12,9	19,6	28,7	40,2	49,8
20	4,5	7,6	11,4	17,2	25,1	37,7	48,6

Fonte: Melo (2014).

Figura 4.50 - Plano complexo (Cole-Cole) da mistura asfáltica convencional moldada em laboratório



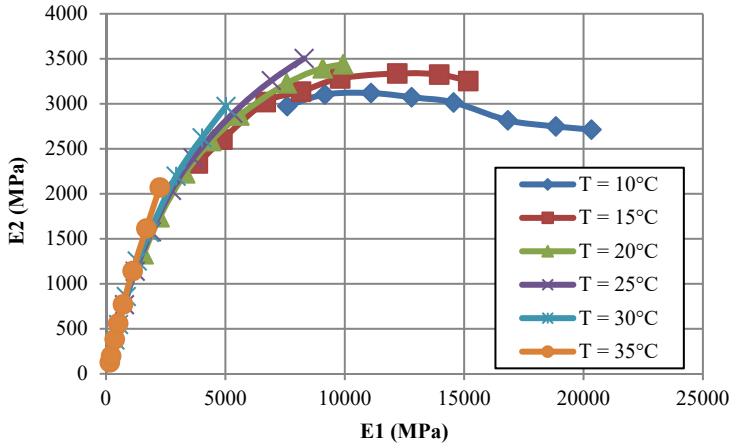
Fonte: Melo (2014).

Quadro 4.74 - Caracterização da mistura asfáltica convencional extraída de campo

Módulo Complexo |E*| (MPa)						
Freq. (Hz)	T = 10°C	T = 15°C	T = 20°C	T = 25°C	T = 30°C	T = 35°C
0,1	8151	4499	2059	1090	529	203
0,2	9678	5525	2838	1671	758	290
0,5	11529	7337	3994	2470	1208	528
1	13163	8749	5110	3417	1811	755
2	14866	10342	6278	4367	2405	1047
5	17065	12647	8227	6046	3666	1596
10	19041	14346	9693	7651	4803	2337
20	20511	15517	10509	9006	5838	3059
Ângulo de fase δ (°)						
Freq. (Hz)	T = 10°C	T = 15°C	T = 20°C	T = 25°C	T = 30°C	T = 35°C
0,1	21,4	31,3	40,2	44,8	45,4	38,9
0,2	18,7	28,1	37,8	43,0	46,3	43,1
0,5	15,7	24,3	33,9	39,7	45,3	46,6
1	13,5	21,0	30,4	36,6	43,8	47,8
2	11,7	18,5	27,2	33,3	40,8	47,4
5	9,5	15,3	23,1	28,6	36,8	45,7
10	8,3	13,4	20,5	25,2	33,1	43,7
20	7,6	12,1	19,1	22,9	30,6	42,6

Fonte: Trichês (2014).

Figura 4.51 - Plano complexo (Cole-Cole) da mistura asfáltica convencional extraída de campo



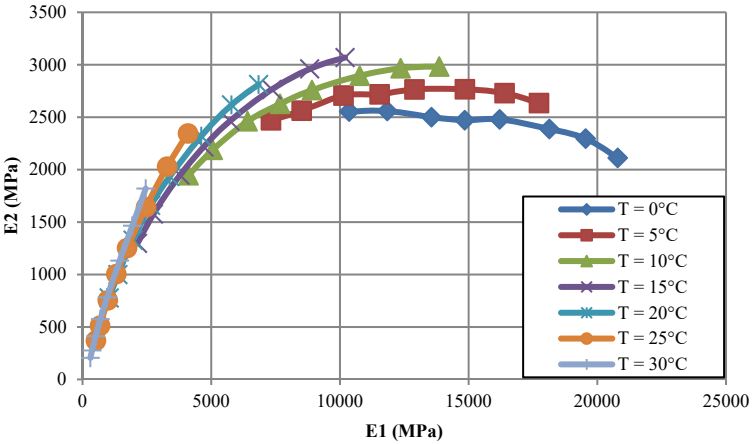
Fonte: Trichês (2014).

Quadro 4.75 - Caracterização da mistura com asfalto-borracha moldada em laboratório

Módulo Complexo |E*| (MPa)							
Freq. (Hz)	T = 0°C	T = 5°C	T = 10°C	T = 15°C	T = 20°C	T = 25°C	T = 30°C
0,1	10669	7725	4556	2497	1294	637	366
0,2	12112	8891	5512	3173	1697	851	465
0,5	13786	10493	6868	4256	2369	1236	657
1,0	15053	11859	8111	5207	3123	1652	899
2	16393	13190	9330	6232	3900	2136	1230
5	18293	15110	11151	7857	5163	2963	1834
10	19680	16623	12709	9308	6350	3861	2427
20	20899	17929	14174	10649	7395	4719	3055
Ângulo de fase δ (°)							
Freq. (Hz)	T = 0°C	T = 5°C	T = 10°C	T = 15°C	T = 20°C	T = 25°C	T = 30°C
0,1	13,9	18,7	25,3	31,3	36,9	35,6	34,2
0,2	12,2	16,8	23,4	29,8	36,1	37,0	36,5
0,5	10,5	15,0	21,0	27,3	34,1	37,6	38,9
1,0	9,5	13,3	18,9	25,2	32,1	37,5	39,8
2	8,7	12,1	17,2	23,3	29,8	35,9	39,5
5	7,5	10,6	15,1	20,6	26,7	33,7	38,2
10	6,7	9,5	13,5	18,6	24,4	31,7	37,2
20	5,8	8,5	12,2	16,8	22,4	29,8	36,6

Fonte: Marcon (2016).

Figura 4.52 - Plano complexo (Cole-Cole) da mistura com asfalto-borracha moldada em laboratório



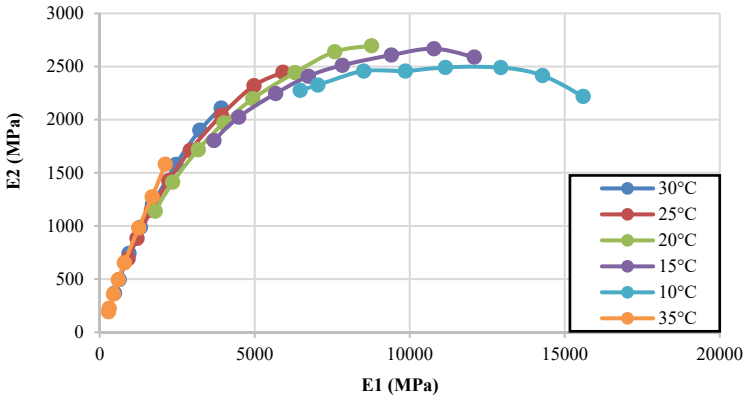
Fonte: Marcon (2016).

Quadro 4.76 - Caracterização da mistura asfalto-borracha extraída de campo

Módulo Complexo |E*| (MPa)						
Freq. (Hz)	T = 10°C	T = 15°C	T = 20°C	T = 25°C	T = 30°C	T = 35°C
0,1	6854	4102	2121	1148	601	340
0,2	7409	4919	2742	1492	800	378
0,5	8862	6102	3612	2022	1200	571
1	10159	7146	4463	2642	1642	775
2	11424	8217	5403	3382	2081	1027
5	13173	9761	6756	4421	2924	1595
10	14485	11105	8026	5490	3747	2118
20	15751	12354	9170	6390	4450	2640
Ângulo de fase δ (°)						
Freq. (Hz)	T = 10°C	T = 15°C	T = 20°C	T = 25°C	T = 30°C	T = 35°C
0,1	19,4	26,1	32,5	37,1	37,8	34,6
0,2	18,3	24,3	31,0	36,3	38,3	36,7
0,5	16,1	21,6	28,4	34,6	38,2	39,0
1	14,0	19,7	26,2	32,7	37,0	39,6
2	12,6	17,8	24,0	30,4	35,3	39,5
5	10,9	15,5	21,2	27,5	32,7	38,0
10	9,6	13,9	19,2	25,0	30,5	37,0
20	8,1	12,1	17,1	22,5	28,3	36,8

Fonte: Trichês (2014).

Figura 4.53 - Plano complexo (Cole-Cole) da mistura com asfalto-borracha extraída de campo



Fonte: Trichês (2014).

A partir da observação das figuras tem-se a seguinte orientação quanto à execução dos ensaios de fadiga:

- Mistura convencional com placas moldadas em laboratório: os ensaios de fadiga poderiam ser realizados na temperatura de

20ºC e frequência de 20 Hz ou na temperatura de 15ºC e frequência de 10 Hz ou 20 Hz;

- Mistura convencional com placas extraídas em campo: os ensaios de fadiga poderiam ser realizados a temperatura entre 15ºC e 20ºC e frequências entre 10 Hz e 20 Hz;
- Mistura asfalto-borracha com placas moldadas em laboratório: os ensaios de fadiga poderiam ser realizados a temperatura entre 10ºC e 15ºC e frequências entre 10 Hz e 20 Hz;
- Mistura asfalto-borracha com placas extraídas em campo: os ensaios de fadiga poderiam ser realizados a temperatura entre 20ºC e frequências entre 10 Hz e 20 Hz ou temperatura de 15ºC e frequência de 10 Hz;

Os ensaios de resistência à fadiga das misturas de concreto asfáltico, seguiu-se as diretrizes da norma EN 12697-24 - *Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 24: Resistance to Fatigue*, combinado com as observações dos plano complexo Cole-Cole no que diz respeito à temperatura de ensaio.

Assim, no que se refere às condições de ensaio, determinou-se para esta pesquisa as seguintes diretrizes de condução:

- Ensaios conduzidos sob carregamento sinusoidal contínuo e deformação controlada;
- Critério de ruptura sendo a redução de 50% do módulo complexo inicial, com módulo inicial determinado no centésimo ciclo;
- Temperatura do ensaio definida com base no comportamento reológico das misturas de concreto asfáltico, segundo o plano complexo (Cole-Cole), em termos de maior dissipação de energia; e
- Frequência de teste de 10 Hz, equivalente a velocidade de 72 km/h (CHABOT et al.,2009 apud MELO, 2014).

Foram obtidas, então, 4 curvas de fadiga para cada tipo de mistura e condição de moldagem dos corpos de prova. Para a mistura convencional com corpos de prova obtidos das placas extraídas de campo, fez-se a caracterização do comportamento à fadiga para temperatura também de 20ºC, uma vez que pelo plano complexo Cole-Cole, o ensaio poderia ser feito também nesta temperatura.

Para a realização dos ensaios de fadiga das misturas aplicadas em campo, foram serrados os corpos de prova das placas extraídas e

escolhidos aqueles com mesma ordem de grandeza da porcentagem de volume de vazios e que representassem o segmento.

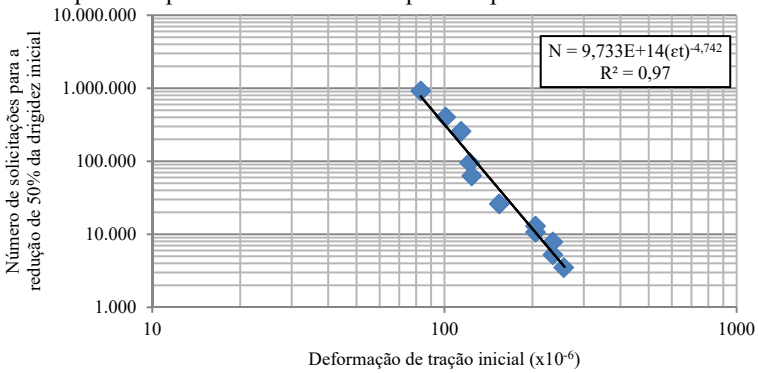
Os Quadros de 4.77 a 4.81 mostram os resultados dos ensaios de fadiga e as respectivas curvas de fadiga (Figuras de 4.54 a 4.58) para cada mistura ensaiada. Para a definição da porcentagem de volume de vazios dos corpos de prova serrados de placas extraídas em campo foram considerados os valores das densidades máximas teóricas medidas, sendo de 2,705 para mistura convencional e de 2,662 para a mistura com asfalto-borracha.

Quadro 4.77 - Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura convencional com corpos de prova serrados a partir de placas extraídas de campo. Temperatura de ensaio de 15ºC.

Estaca	Gmb (g/cm^3)	Vv (%)	Deformação de tração inicial ($x10^{-6}$)	Módulo Complexo Inicial (MPa)	Ângulo de fase Inicial (graus)	Número de solicitações
0+680	2,541	6,04	235	11711	19,5	5.240
0+700	2,548	5,80	205	10609	18,7	10.676
0+900	2,573	5,11	256	11963	19,6	3.502
0+940	2,564	5,20	235	10640	18,6	7.854
0+800	2,553	5,61	205	10095	17,3	12.966
0+880	2,556	5,51	101	14128	16,7	402.064
0+940	2,556	5,51	154	10953	16,7	26.092
0+940	2,553	5,49	122	12817	16,3	95.412
0+740	2,568	5,05	124	12462	15,7	63.124
0+660	2,549	5,77	83	13341	13,2	917.623
0+840	2,558	5,41	114	10567	15,0	257.441

Fonte: Trichês (2014).

Figura 4.54 - Curva de fadiga para a mistura convencional com corpos de prova serrados a partir de placas extraídas de campo. Temperatura de ensaio de 15ºC.



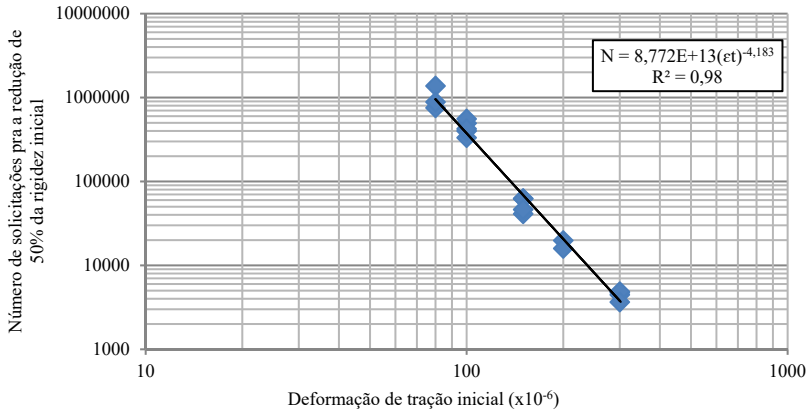
Fonte: Trichês (2014).

Quadro 4.78 - Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura convencional com corpos de prova serrados a partir de placas moldadas em laboratório. Temperatura de ensaio de 15ºC.

Corpos de prova	Gmb (g/cm^3)	Vv (%)	Deformação de tração inicial ($x10^{-6}$)	Número de solicitações
1.1	2,574	4,14	80	1373179
1.2	2,532	5,68	100	493593
1.3	2,542	5,31	100	556334
1.4	2,559	4,68	100	332601
1.5	2,579	3,93	100	399217
2.1	2,520	6,14	100	423524
2.2	2,569	4,32	150	62265
2.3	2,547	5,15	150	62532
2.4	2,563	4,54	150	46236
2.5	2,535	5,60	200	19788
3.1	2,585	3,74	200	15921
3.2	2,578	3,97	300	4734
3.3	2,579	3,95	300	4461
3.4	2,601	3,14	300	4870
3.5	2,587	3,66	300	3653

Fonte: Trichês (2014).

Figura 4.55 - Curva de fadiga para a mistura convencional com corpos de prova serrados a partir de placas moldadas em laboratório. Temperatura de ensaio de 15ºC.



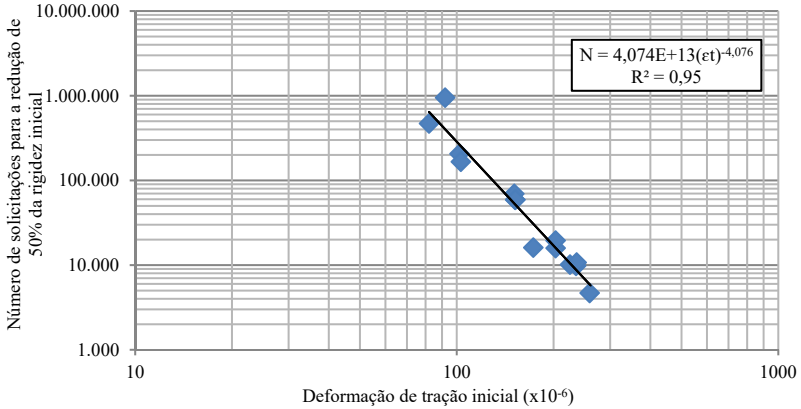
Fonte: Trichês (2014).

Quadro 4.79 - Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura convencional com corpos de prova serrados a partir de placas extraídas de campo. Temperatura de ensaio de 20ºC.

Estaca	Gmb (g/cm3)	Vv (%)	Deformação de tração inicial ($x10^{-6}$)	Módulo Complexo Inicial (MPa)	Ângulo de fase Inicial (graus)	Número de solicitações
0+740	2,567	5,09	235	9390	23,5	9.801
0+790	2,551	5,70	151	10234	20,8	69.560
0+840	2,558	5,43	259	8463	23,7	4.688
0+660	2,525	6,64	225	7340	25,3	10.155
0+660	2,535	6,28	203	6376	26,7	15.880
0+900	2,559	5,41	152	9592	22,6	59.097
0+960	2,529	6,52	173	7773	22,9	16.101
0+700	2,548	5,80	102	9723	19,3	206.510
0+800	2,563	5,25	92	10230	20,8	949.810
0+700	2,551	5,68	103	10236	20,5	166.234
0+680	2,547	5,84	82	8436	22,2	470.481
0+820	2,534	6,33	152	9592	22,6	59.097
0+660	2,521	6,80	203	7086	25,0	19.495
0+940	2,543	6,00	236	8804	25,0	10.732

Fonte: Trichês (2014).

Figura 4.56 - Curva de fadiga para a mistura convencional com corpos de prova serrados a partir de placas extraídas de campo. Temperatura de ensaio de 20 ºC.



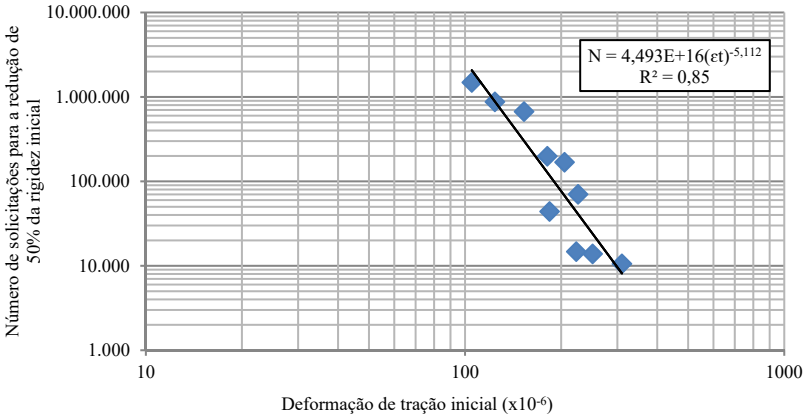
Fonte: Trichês (2014).

Quadro 4.80 - Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura com asfalto-borracha com corpos de prova serrados a partir de placas extraídas de campo. Temperatura de ensaio de 20 ºC.

Estaca	Gmb (g/cm^3)	Vv (%)	Deformação de tração inicial ($x10^{-6}$)	Módulo Complexo Inicial (MPa)	Ângulo de fase inicial (graus)	Número de solicitações
0+760	2,526	5,10	251	6977	26,2	13.849
0+900	2,507	5,84	181	6955	25,9	198.515
0+820	2,528	5,05	310	5417	29,4	10.564
0+900	2,526	5,11	184	5705	27,7	43.972
0+820	2,536	4,75	205	6755	26,2	168.465
0+760	2,524	5,17	223	6640	25,3	14.726
0+900	2,528	5,05	226	4935	28,4	70.327
0+760	2,543	4,46	153	7590	23,9	670.900
0+760	2,526	5,13	124	6493	22,6	874.680
0+680	2,524	5,20	105	6950	22,1	1.484.580

Fonte: Trichês (2014).

Figura 4.57 - Curva de fadiga para a mistura com asfalto-borracha com corpos de prova serrados a partir de placas extraídas de campo. Temperatura de ensaio de 20ºC.



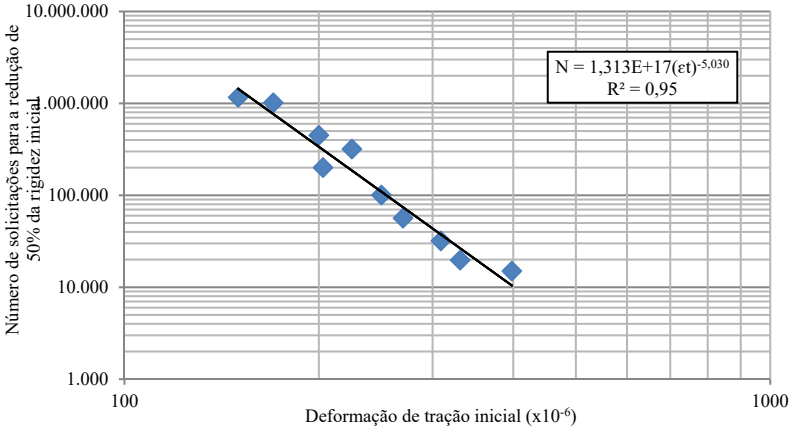
Fonte: Trichês (2014).

Quadro 4.81 - Resultados dos ensaios de fadiga para a mistura asfalto-borracha com corpos de prova serrados a partir de placas moldadas em laboratório. Temperatura de ensaio de 20 ºC.

Corpos de prova	Gmb (g/cm^3)	Vv (%)	Deformação de tração inicial ($x10^{-6}$)	Módulo complexo inicial (MPa)	Ângulo de fase inicial (graus)	Número de solicitações
1	2,546	4,22	331	4916	32,5	19.725
2	2,504	5,79	309	4457	37,5	31.958
3	2,520	5,19	250	5774	34,0	100.780
4	2,518	5,27	150	6404	29,6	1.165.915
5	2,520	5,19	225	5762	33,4	318.901
6	2,526	4,96	200	6180	30,4	450.000
7	2,506	5,72	170	6421	31,6	1.016.251
8	2,518	5,26	398	4589	35,7	15.000
9	2,512	5,48	270	5532	34,0	56.510
10	2,506	5,72	203	6921	32,7	200.391

Fonte: Marcon (2016).

Figura 4.58 - Curva de fadiga para a mistura com asfalto-borracha com corpos de prova serrados a partir de placas moldadas em laboratório. Temperatura de ensaio de 20 ºC



Fonte: Marcon (2016).

4.6.3.4 Ensaios de deformação permanente

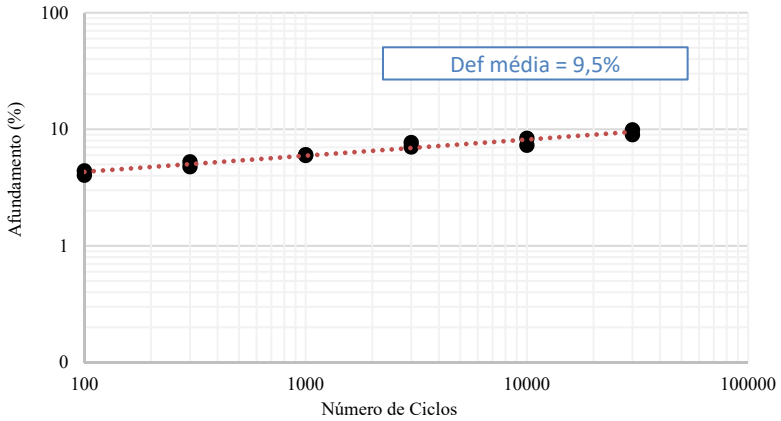
O Quadro 4.82 apresenta as características dos corpos de prova ensaiados quanto à deformação permanente. As Figuras de 4.59 a 4.63 apresentam os resultados obtidos.

Quadro 4.82 - Características dos corpos de prova ensaiados quanto à deformação permanente

Mistura	Identificação	Placa	Gmb (g/cm^3)	Vv (%)
Convencional	Placas moldadas em laboratório	1	2,520	6,13
		2	2,564	4,50
	Placas extraídas em campo	Estaca 0+680 BE	2,501	7,56
		Estaca 0+680 BD	2,523	6,74
		Estaca 0+800	2,541	6,07
		Estaca 0+720	2,533	6,35
Asfalto-borracha	Placas moldadas em laboratório	1	2,526	4,98
		2	2,507	5,69
	Placas extraídas em campo	Estaca 0+820	2,533	4,84
		Estaca 0+680	2,521	5,31

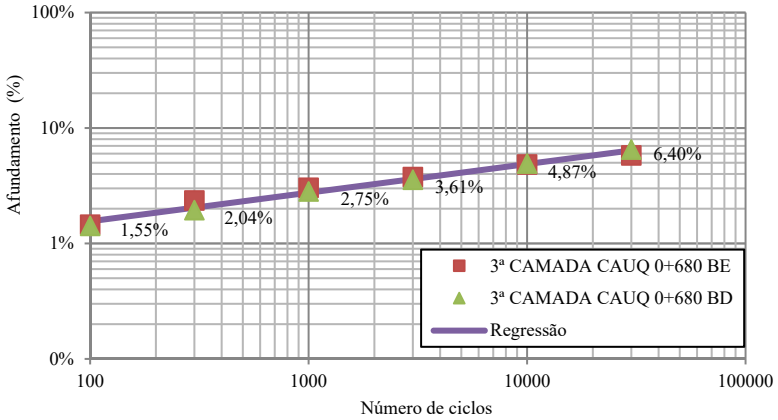
Fonte: Trichês (2014).

Figura 4.59 - Deformação permanente da mistura asfáltica convencional. Placas moldadas em laboratório



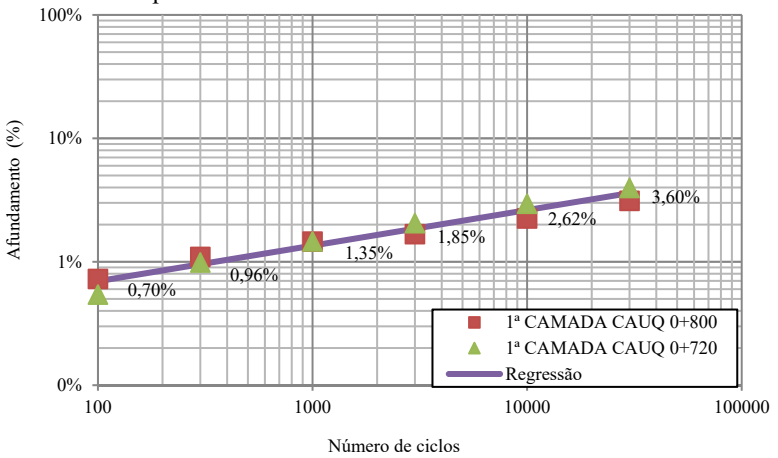
Fonte: Melo (2014).

Figura 4.60 - Deformação permanente da mistura asfáltica convencional. Placas extraídas de campo



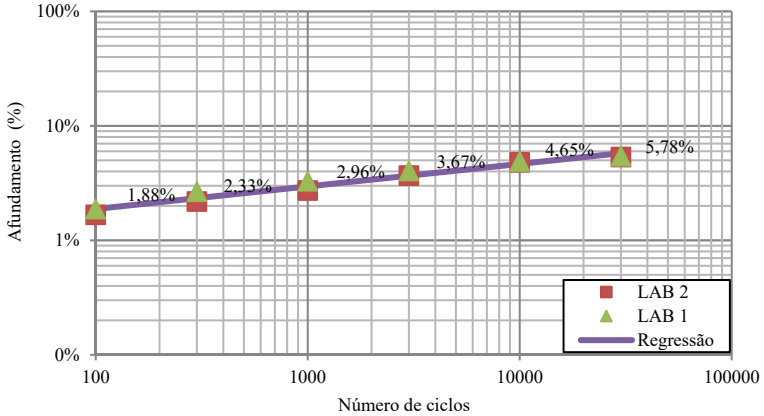
Fonte: Trichês (2014).

Figura 4.61 - Deformação permanente da mistura asfáltica convencional. Placas extraídas de campo



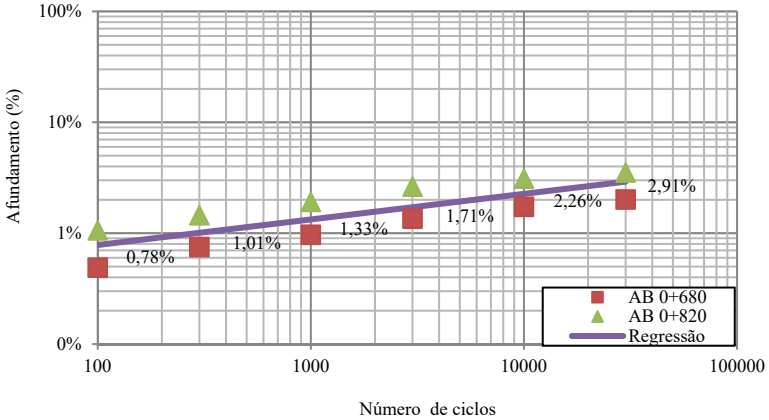
Fonte: Trichês (2014).

Figura 4.62 - Deformação permanente da mistura com asfalto-borracha. Placas moldadas em laboratório



Fonte: Trichês (2014).

Figura 4.63 - Deformação permanente da mistura asfalto-borracha. Placas extraídas de campo



Fonte: Trichês (2014).

O pior desempenho quanto à deformação permanente foi para a mistura convencional moldada em laboratório, ou seja, 9,5%, esse valor está muito próximo ao limite de 10% estabelecido em norma. É possível evidenciar melhoria no desempenho à deformação permanente proporcionada pela mistura com asfalto-borracha. Comparando-se as placas moldadas em laboratório o ganho foi de 60% no desempenho quanto a formação de trilhas de rodas da mistura com asfalto-borracha

em relação à convencional. Para as placas extraídas esse ganho foi entre 20% e 45%.

As propriedades que influenciam na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas estão associadas, principalmente, a formulação da mistura (composição granulométrica), dosagem (tipo e teor de ligante) e a compactação. Assim, a melhoria proporcionada no aspecto da deformação permanente da mistura com asfalto-borracha está atrelada às modificações das características do ligante pela borracha, tendo em vista que as misturas possuem a mesma granulometria e foram executadas com o teor ótimo de ligante.

4.7 ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DOS SEGMENTOS

4.7.1 Dados de entrada

A estimativa de vida útil dos segmentos foi realizada a partir dos valores de módulo resiliente obtidos da seguinte forma:

- A): módulos obtidos por retroanálise das bacias de deflexões levantadas com o FWD no ano zero;
- B): módulos obtidos nos ensaios de laboratório (somente para a mistura asfáltica) com os corpos de prova extraídos de campo. Para as demais camadas, os módulos foram obtidos por retroanálise.

Os valores de módulo resiliente obtidos estão mostrados no Quadro 4.83. Com os dados obtidos foi realizada a análise mecanicista através do programa Elsym5 com carregamento do eixo padrão de 82 kN e pressão de contato dos pneus de 0,56 MPa. O critério de ruptura analisado foi o de deformação de tração no fundo da camada de revestimento (εt).

Para a estimativa de vida útil dos pavimentos em termos de fadiga do revestimento asfáltico a partir da análise da máxima deformação de tração da fibra inferior do revestimento asfáltico foram utilizados os modelos apresentadas no Quadro 4.83. As equações de fadiga foram obtidas para as misturas asfálticas com ligante convencional e com asfalto-borracha.

Quadro 4.83 - Módulos das camadas obtidos por retroanálise e experimentalmente (camada asfáltica)

Local	Camadas	Material	Esp. (cm)	MR (A) (MPa	MR (B) (MPa)	Coef. Poisson
SM01	Revest.	Convencional	16,5	5181	6763	0,30
	Base	Brita graduada	18	197	193	0,35
	Sub base	Macadame seco	20	187	170	0.35
	Subleito	Areia	-	237	248	0,35
SM02	Revest.	Convencional	18	5233	6763	0,30
	Base	Brita graduada	18	199	163	0,35
	Sub base	Macadame seco	20	190	133	0.35
	Subleito	Areia	-	239	236	0,35
SM03	Revest.AC	Convencional	11	5796	6763	0,27
	Revest.AB	Asfalto-borracha	6,1	4695	5859	0,30
	Base	Brita graduada	18	212	163	0,35
	Sub base	Macadame seco	20	131	133	0,35
	Subleito	Areia	-	230	238	0,35

Fonte: Autora (2015)

Os ensaios de fadiga foram realizados com amostras obtidas em campo e moldadas em laboratório. O Quadro 4.88 apresenta os parâmetros das curvas de fadiga obtidas. Na abreviatura utilizada a primeira letra determinada o tipo de amostra, se foi de campo “C” ou laboratório “L”. A segunda letra se refere ao tipo de mistura “C” convencional e “B” asfalto-borracha o os algarismos indicam a temperatura de condução do ensaio.

Quadro 4.84 - Parâmetros experimentais obtidos para as equações de fadiga

Parâmetros	CC15 (Trichês, 2014)	LC15 (Melo, 2015)	CC20 (Trichês, 2014)	CB20 (Trichês, 2014)	LB20 (Marcon, 2016)
a	9,73E+14	8,77E+13	4,07E+13	4,49E+16	1,31E+17
b	-4,742	-4,183	-4,076	-5,112	-5,03
R^2	0,97	0,98	0,95	0,85	0,95

Fonte: Autora (2015).

4.7.2 Análise do critério da máxima deformação de tração na fibra inferior do revestimento

O Quadro 4.85 mostra os valores de deformação de tração obtidos para os segmentos:

Para a estimativa de vida útil das estruturas dos segmentos (em termos do número de solicitações do eixo padrão de 8,2 tf segundo metodologia da USACE e considerando fator campo laboratório igual a 1) foi utilizado o critério de máxima deformação de tração da fibra

inferior do revestimento. Para tanto, foram utilizadas as equações de fadiga obtidas nos ensaios com a mistura asfáltica. Os valores obtidos estão apresentados no Quadro 4.86.

Quadro 4.85 - Deformação de tração na fibra inferior do revestimento

Local	Deformação εt ($x10^{-6}$) (A)	Deformação εt ($x10^{-6}$) (B)
Segmento 01	118	100
Segmento 02	106	95
Segmento 03	44,2 (conv.)	36,5 (conv.)
	119 (borracha)	109 (borracha)

Fonte: Autora (2015)

Para o segmento 03, foi utilizado no cálculo o valor de deformação obtido na face inferior do revestimento convencional (a 11 cm de profundidade) e na face inferior do revestimento com asfalto-borracha (a 17,1 cm de profundidade). Como os valores de deformação foram maiores para a face inferior do revestimento com asfalto-borracha, (evidentemente por ser a região de interface entre uma camada mais rígida que é o revestimento asfáltico e uma camada elástica, que é a base de material granular) e consequentemente a vida útil foi menor, tomou-se os resultados obtidos para a camada com asfalto-borracha como sendo iguais para toda a camada de revestimento, admitindo-se que o trincamento se dará simultaneamente em ambas as camadas.

Quadro 4.86 - Resultados para a estimativa de vida útil dos segmentos

Local	Curva de fadiga	εt ($x10^{-6}$) (A)	N (A)	εt ($x10^{-6}$) (B)	N (B)
SM01 (16,5 cm)	CC 15°C (Trichês, 2014)	118	1,29E+05	100	3,19E+05
	CC 20°C (Trichês, 2014)		1,32E+05		2,87E+05
	LC 15°C (Melo, 2014)		1,70E+05		3,78E+05
SM02 (18 cm)	CC 15°C (Trichês, 2014)	106	2,42E+05	95	4,07E+05
	CC 20°C (Trichês, 2014)		2,26E+05		3,54E+05
	LC 15°C (Melo, 2014)		2,96E+05		4,68E+05
SM03a (17,1 cm)	CB 20°C (Trichês, 2014)	119	1,10E+06	109	1,65E+06
	LB 20°C (Marcon, 2016)		4,77E+06		7,08E+06
SM03b (18,0 cm)	CB 20°C (Trichês, 2014	112	1,50E+06	102	2,42E+06
	LB 20°C (Marcon, 2016)		6,47E+06		1,04E+07

Fonte: Autora (2015)

Os resultados mostram que a estrutura do pavimento executado está muito aquém de suportar o tráfego estimando para o período de projeto, indicando que, provavelmente, se terá a manifestação de trincas por fadiga já no primeiro ano de abertura ao tráfego.

Como era esperado, a estimativa de vida útil obtida a partir dos valores de módulo proveniente dos ensaios de laboratório (B) foi maior do que para os obtidos por retroanálise (A). Ressalta-se que o método iterativo utilizado nos programas de retroanálise pode não analisar corretamente o estado de tensões que ocorre nas camadas granulares e no subleito. Entretanto, os resultados obtidos podem ser considerados representativos uma vez mostram semelhança entre os procedimentos.

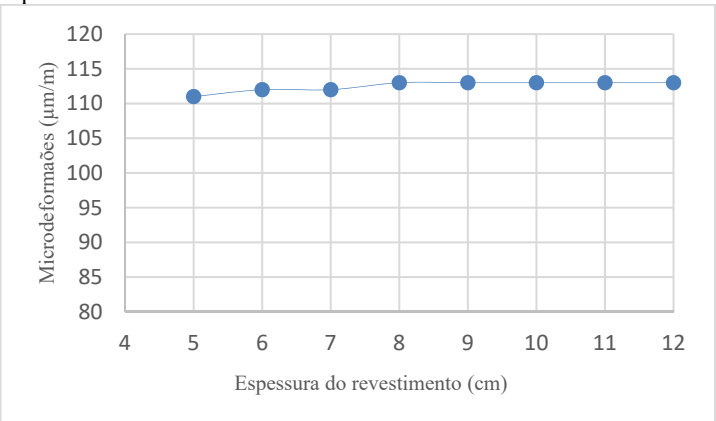
Existe diferença entre a estimativa de vida útil obtida para as amostras extraídas de campo em comparação com às moldadas em laboratório, sendo bastante significativa para a mistura com asfalto-borracha. O fato da estimativa de vida útil ser menor para às amostras extraídas de campo tende a ser em decorrência da operação de extração, transporte e armazenamento das placas, que apesar de todo cuidado empregado nessas atividades, em algumas placas pode ter havido microfissuras imperceptíveis. Também no campo se tem uma maior variação no volume de vazios da mistura em comparação ao controle que se tem na moldagem das placas em laboratório.

Comparando-se o comportamento obtido pelo segmento executado com o conceito de camadas integradas (SM3.a) com o segmento em camadas singulares (SM02) nota-se um acréscimo de estimativa de vida útil, quanto ao critério de ruptura por fadiga, em média de 4,9 vezes maior para o SM3.a. Essa diferença poderia ainda ser de 6,8 vezes se caso a espessura total da camada fosse atendida, ou seja, um perda de 40% apenas por não seguir a espessura indicada.

Foram feitas também simulações com aumento da espessura da camada de asfalto-borracha, porém mantendo a mesma espessura final do revestimento. Foi verificado que a tensão de tração da base da camada não altera significativamente em função do aumento da espessura, conforme mostrado na Figura 4.66 (os resultados mostrados são para a simulação utilizando o procedimento “A”. No entanto, a conclusão é a mesma para os módulos obtidos pelo procedimento "B”.

Esse fato evidencia a não obrigatoriedade de execução de toda a camada asfáltica em um único material (camada singular) e sim a execução de misturas asfálticas com maior desempenho a fadiga por exemplo, apenas na região com maior esforço de tração (camadas integradas). Essa condição viabiliza, inegavelmente, o custo da construção dos pavimentos e pode contribuir para a difusão do uso de misturas asfálticas otimizadas com relação ao seu desempenho.

Figura 4.64 - Relação entre as microdeformações da estrutura com o aumento da espessura da camada de asfalto-borracha

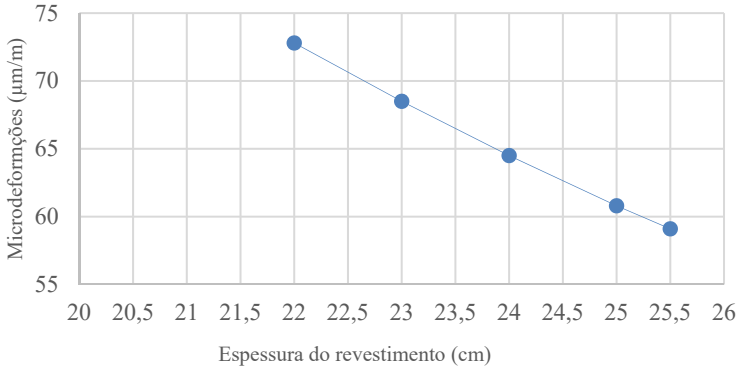


Fonte: Autora (2015)

A Figura 4.65 mostra a relação das microdeformações na estrutura do revestimento asfáltico convencional com o acréscimo da espessura. Nota-se que para se ter o mesmo desempenho, em termos de vida útil obtido para o segmento com asfalto-borracha deve-se limitar a deformação específica da fibra inferior da camada de revestimento em 59,3 µm/m. Para isso, de acordo com a figura, a espessura total da camada de revestimento deveria ser de 25,5 cm, ou seja, um acréscimo de 7,5 cm em relação à estrutura projetada para o segmento 02. A diferença é ainda maior (10,5 cm) quando comparado ao projeto da rodovia BR-101/SC, que foi executado com 15 cm. Ressalta-se que esse acréscimo seria apenas para atingir a mesma estimativa de vida útil proporcionada pelo segmento 03, com camadas integradas, mas ainda assim não atenderia ao tráfego do período de projeto.

A alternativa de execução de parte do revestimento asfáltico com asfalto modificado por borracha, embora o ligante tenha um custo maior, pode ser uma opção economicamente viável para redução dos custos da construção assim como, da manutenção, tendo em vista o aumento na estimativa de vida útil proporcionada em relação aos revestimentos convencionais. Para além da vantagem econômica com a diminuição de custos de manutenção decorrente do aumento da vida útil dos pavimentos, ainda proporciona um inegável benefício ambiental devido ao reaproveitamento de pneus inservíveis.

Figura 4.65 - Relação entre as microdeformações da estrutura com a espessura do revestimento convencional



Fonte: Autora (2015)

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

São muitos os problemas a serem resolvidos no âmbito da pavimentação em nosso país, com destaque para o aparecimento precoce das trincas por fadiga e o acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda. Esses dois defeitos são os principais tipos de problemas que acometem os pavimentos e têm como causa principal o crescente aumento do volume de tráfego e também o aumento das cargas por eixo.

O caminho para o alcance das condições esperadas para as estruturas de pavimentos, que são conforto, segurança e economia, passa pela concepção de projetos e utilização de materiais adequados às condições de cada região do país, além do emprego de técnicas modernas de execução e de controle.

Com relação a fase executiva dos pavimentos, ficou evidente que a falta de cuidados com qualquer etapa pode traduzir-se em perda de desempenho das estruturas com relação a vida útil. Neste trabalho foi visto que a falta de controle na espessura do revestimento gerou uma diminuição da vida útil em torno de 40% para o segmento 03.

Ainda, a falta de controle com a temperatura de compactação foi verificada em quase todos os segmentos. Apesar disso, não houve prejuízo com relação a compactação, em todas as camadas o grau de compactação mínimo foi atingido.

De maneira geral, os objetivos traçados para esse trabalho foram cumpridos, com destaque ainda para a geração de dados relativos à construção de rodovias sob o âmbito do governo federal para alimentar o Sistema da Rede Temática de Tecnologia dos Asfaltos (SRTA).

A utilização de misturas asfálticas modificadas também tem sido uma alternativa eficaz para driblar a baixa durabilidade dos revestimentos, uma vez que podem proporcionar, como visto nesse trabalho, um aumento de até 4,9 vezes na estimativa de vida útil, em relação às misturas com ligante convencional.

Com relação as avaliações estruturais e funcionais realizadas de forma a caracterizar a rodovia no ano de abertura ao tráfego, cabe ressaltar a importância da utilização de equipamentos confiáveis e de alto rendimento, como os utilizados na pesquisa: FWD, Perfilômetro Inercial (*Laser*) e o *Grip Tester*.

Os levantamentos com o FWD possibilitaram o obtenção dos módulos utilizados na análise estrutural dos pavimentos. Os módulos foram obtidos com o programa Bakfaa que realizou um bom ajuste entre

as bacias teóricas e as bacias medidas, traduzido em baixos valores de erro e raiz média quadrática.

A obtenção de bacias de deformação nos pavimentos com a Viga Benkelman (não automatizada) é um processo excessivamente demorado. Exige um número maior de operadores, habilidade do motorista, boas condições do caminhão e ainda pode implicar em erros nas leituras devido à proximidade das mesmas (25 cm). Deve haver boa coordenação entre o operador que registra a passagem do caminhão pelo ponto determinado e o que faz a leitura. Contudo, os resultados podem ser considerados satisfatórios uma vez que os módulos obtidos por retroanálise foram semelhantes entre os segmentos, mostrando boa repetibilidade, como já é de conhecimento geral no meio rodoviário, onde o uso desse equipamento já é bastante consolidado.

Os levantamentos das condições funcionais do pavimento utilizando o Perfilômetro à *Laser* evidenciou que os segmentos atendem às exigências mínimas quanto aos índices de irregularidade longitudinal (IRI) e afundamentos em trilha de rodas (ATR) previstos para a entrega de pavimentos novos, conforme Instrução de Serviço N°13/2013 do DNIT. Apesar das exigências contidas nessa Instrução de Serviço não se aplicar aos segmentos executados, servem como parâmetro para análise da situação encontrada já que as normas e manuais vigentes não fazem menção às características iniciais dos pavimentos.

Entre os segmentos, o que apresentou maior valor de IRI foi o segmento 02 (2,0 m/km). Sabe-se, com base na literatura, que na maioria dos casos, o IRI inicial influencia no IRI futuro dos pavimentos, acarretando em menor vida útil quanto maior foi o valor inicial, devido a maior solicitação por cargas dinâmicas. Todavia, é de se esperar que o segmento 02 tenha resultados insatisfatórios quanto a esse parâmetro.

As medidas de macro e microtextura permitam a avaliação dos pavimentos quanto às condições de aderência pneu-pavimento. Foi verificado que todos os segmentos proporcionam condições adequadas de segurança ao tráfego. As medidas de atrito realizadas com o *Grip Tester* proporcionaram maiores valores de IFI em comparação com às medidas com o Pêndulo Britânico. Apesar de ocasionar em uma superfície mais favorável em termos de atrito, reproduz com mais acurácia as características superficiais dos pavimentos em comparação com o Pêndulo Britânico, que realiza apenas leituras pontuais.

O cálculo do IFI possibilitou traçar as curvas de atrito em função da velocidade de deslocamento. Esse parâmetro pode ser utilizado como ferramenta para as atividades de manutenção da rodovia, permitindo realizar intervenções quando os níveis de atrito não forem mais

compatíveis com a velocidade de operação da via, ou até mesmo para determinar a velocidade de operação em função das condições mínimas de segurança.

Para a análise estrutural dos pavimentos foram utilizados os módulos resilientes obtidos por retroanálise das bacias de deformação levantadas com o FWD no ano zero.

Como resultado, foi visto que, para a mistura convencional, a estimativa de vida útil foi semelhante entre as amostras de campo e as de laboratório. Já para a mistura com asfalto-borracha, a estimativa de vida útil baseada na curvas de laboratório foi 4 vezes maior do que para as curvas obtidas com as placas de campo.

Comparando-se o desempenho entre os segmentos, constatou-se um acréscimo de 4,9 vezes na vida útil do segmento 03 (executado com camadas integradas utilizando asfalto-borracha), em relação ao segmento 02, executado apenas com mistura asfáltica convencional (camada singular). Para que o segmento 02 pudesse atingir a mesma estimativa de vida útil do segmento 03, seria necessário um acréscimo de 7,5 cm de espessura, totalizando 25,5 cm de revestimento. Ressalta-se que essa espessura seria apenas para alcançar a estimativa de vida útil do segmento 02.

A estimativa de vida útil dos segmentos indicou que os pavimentos projetados e executados conforme as normas técnicas vigentes no país, não atendem a vida útil definida em projeto. Essa fato enfatiza a necessidade de mudanças de grande impacto nos conceitos empregados atualmente e confirma a relevância da pesquisa em curso atualmente no país, patrocinada pela Petrobras em conjunto com diversas universidades brasileiras, que visa elaborar um novo método de dimensionamento de pavimentos asfálticos, adaptado à realidade brasileira.

Para que seja possível estabelecer em que tempo se dará o alcance do tráfego estimado (número N) ainda é necessário a análise a partir do monitoramento dos segmentos (objeto de pesquisas futuras). Assim, com base na observação do início do trincamento no revestimento, determinar, o fator laboratório-campo, específico para os segmentos analisados.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Apresentar os resultados do monitoramento dos segmentos a partir das avaliações periódicas realizadas após a abertura ao

tráfego e elaborar modelos de previsão de desempenho aplicadas às condições encontradas na região;

- Estabelecer o fator laboratório-campo com base na análise do trincamento nos segmentos e da estimativa de vida útil realizada neste trabalho;

- Obter as informações relativas ao volume e as cargas reais do tráfego da rodovia através dos dados do posto de pesagem localizado a 5 km do local dos segmentos;

- Realizar ensaios de resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica visando o entendimento da condição de trincamento com origem na superfície e analisar se essa situação ocorreu nos segmentos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6954**: Lastro-padrão - determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Argamassa e Concreto - determinação da resistência a tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15617**: Misturas asfálticas - dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF P 98-250-2**: Essais relatifs aux chaussées: préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 2: compactage des plaques. France, 1991.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF P 98-253-1**: Préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 1: essai d'orniérage. France, 1993.

ARTESP, Agencia de Transporte do Estado de São Paulo - **Anexo 06 - serviços correspondentes as funções de conservação.** Disponível em:<http://www.artesp.sp.gov.br/Media/Default/Rodovias/pppTamoios/06 Serviços correspondentes as Funções de Conservação_Final_.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2016.

ALBERNAZ, Claudio Angelo Valadão. **Método simplificado de retroanálise de módulos de resiliência de pavimentos flexíveis a partir da bacia de deflexão.** 1991. 107 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

ANP. **Resolução ANP n. 19, de 11 de julho de 2005.** Disponível em: <http://www.abeda.org.br/legislacao/RESOLUCAO-NR-19.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2016.

APS, Márcia. **Classificação da Aderência pneu-pavimento pelo índice combina *IFI – International Friction Index* para revestimentos asfálticos**. 2006. 208p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM E 303**: Standard test method for measuring surface frictional properties using the british pendulum tester. USA, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONA. **ASTM E965**: Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique. USA. 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM E1844**: Standard specification for a size 10x4-5 smooth-tread friction test tire. USA. 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **ASTM E1960**: Standard practice for calculating international friction index of a pavement. USA. 2011.

BARDINE, Viviam Silveira dos Santos. **Influência do fíler mineral em propriedades de misturas asfálticas densas.** 2013. 344 f. Tese (Doutorado) - Curso Engenharia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Abeda, 2008. 504 p.

BERTOLLO, Sandra Margarido; FERNANDES JÚNIOR, José Leomar; SCHALCH, Valdir. **Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos.** 2002. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/iv-003.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2016.

BORGES, Clarissa Beatriz Sandoval. **Estudo comparativo entre medidas de deflexão com viga Benkelman e FWD em pavimentos da malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. 2001. 197 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

BRANCO, Fernando et al. **Pavimentos Rodoviários**. Portugal: Edições Almedina, S.A., 2011. 388 f.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-PRO 11:** Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis. Rio de Janeiro, 1979.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 024:** Pavimento – determinação das deflexões por Viga Benkelman. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 049:** Solos – determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 052:** Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com o emprego do “Speedy”. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 053:** Misturas betuminosas – percentagem de betume. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 078:** Agregado graúdo – Adesividade ao ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 080:** Solos – análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 089:** Agregados – determinação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 092:** Solo – determinação da massa específica aparente "in situ", com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 129:** Solos – compactação utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 043:** Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 054:** Equivalente de areia. Rio de janeiro, 1997.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 035:** Agregados: determinação da abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 1998.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **DNER-ME 083:** Agregados – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGENS. **Programa de Ampliação da capacidade rodoviária do corredor São Paulo – Curtiba/ Florianópolis – Osório.** 2001.

BRASIL$_A$. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação.** 3. ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p.

BRASIL$_B$. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 313p.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-005 - TER**: Defeitos os pavimentos flexíveis e semirrígidos. Rio de Janeiro, 2003.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-131 - ES:** Pavimentos Flexíveis – concreto asfáltico. Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-108 - ES:** Terraplenagem – aterros. Rio de janeiro, 2009.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-141 - ES:** Pavimentação – base estabilizada granulometricamente. Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-158 – ME -** Mistura asfáltica - determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet. Rio de Janeiro. 2011.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Projeto de Base de Brita Graduada – Lote 29** Araranguá. 2011.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT-144 - ES:** Pavimentação asfáltica – imprimação com ligante asfáltico convencional. Rio de Janeiro, 2014.

CALTRANS. Asphalt Rubber Usage Guide. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA. 2006.

CENPES. Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello. **Estudo das misturas asfálticas da BR-101: Projeto de dosagem superpave**. Rio de Janeiro. 2011.

CNT. **Relatório de Pesquisa CNT de Rodovias 2015.** 2015. Disponível em: <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2015/RelatórioGerencial/PESQUISA_CNT2015_3nov.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2015.

COUTINHO, João Camilo Penna. **Dimensionamento de pavimento asfáltico: Comparação do método do DNER com um métodos mecanístico-empírico aplicado a um trecho**. 2011. 184f. Dissertação (Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

COPPETEC. **AVALIAÇÃO DE QUATRO TRECHOS EXPERIMENTAIS MONITORADOS PELA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (ITAPOÁ, JOAÇABA, URUBICI E ARARANGUA).** Universidade Federal do Rio de janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

DEPARATAMENTO ESTADUAL DE INFRAESTRUTURA DE SANTA CATARINA. **DEINFRA-SC-ES-P-03/92**: Pavimentação – Camada de Macadame Seco. Florianópolis, 1992. 6 p.

DIAS, João Paulo Trabuco. **Influência do envelhecimento na resistência a fadiga de misturas betuminosas.** 2009. 89 f. Tese (Mestrado). Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2009.

EN – European Standard. **EN 12697-24: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt, part 24: Resistance to fatigue**. CEN, Brussels. 2004.

EN – European Standard. **EN 12697-26: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt, part 26: Stiffness.** CEN, Brussels. 2004.

FERNANDES, Ivy Souza. **Avaliação do comportamento mecânico da camada de brita graduada "in situ".** 2000, 184 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

FERREIRA, Jaqueline Carvalho. **Medição do coeficiente de atrito pneu-pavimento em pavimentos asfálticos: Análise da macrotextura e microtextura**. 2015. 184 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

FERREIRA, Patrícia Nunes. **Avaliação da macrotextura de trechos pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do município de Florianópolis**. 2002. 182 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FONSECA, Luiz Felipe da Silva. **Análise das soluções de pavimentação do programa crema 2ª etapa do Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes.** 2013. 226 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FONTES, Liseane Padilha Thives da Luz. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. 2009. 541 f. Tese (Doutorado). Universidade do Minho/Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

FRANCISCO, Ana Paula Santos. **Comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis.** 2012. 132 f. Tese (Mestrado). Escola Superior de Tecnologia e de Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2012.

FRANCO, Filipi Agusto Cinque de Proença. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – Sispav.** 2007. 294 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GOOGLE. Google Earth. Versão 7.1.5. 2015. Araranguá. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth>. Acesso em: 08/08/2016.

HECK, Jean Vivien. **Modélisation des deformations réversibleset permanentes desenrobés bitumineux - applicational' ornièrage des chaussées.** 2001. 228 f. Tese (Doutorado). Université de Nantes, 2001.

LUZIA, Rosa Conceição. **Camadas não ligadas em pavimentos rodoviários**. Portugal. Edições Almedina, S.A., 334 f. 2008.

MACÊDO, Jose Afonso Gonçalves de. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis.** 1996. 477 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.

MARCON, Antonio Fortunato. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina.** 1996. 421 f. Tese (Doutorado). Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São Jose dos Campos, São Paulo, 1996.

MARCON, Mateus Felipe. **Estudo e Comparação do Desempenho mecânico e reológicos de concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais.** Qualificação de Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2016.

MATTOS, João Rodrigo Guerreiro. **Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR-290/RS.** 2009. 137 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2009.

MATTOS, João Rodrigo Guerreiro. **Monitoramento e análise de desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS – A implantação do projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul**. 2014. 250 f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre.

MEDINA, Jacques de; MOTTA, Laura Maria Gorete da. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: Edição dos Autores, 2005. 574 p.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 2014. 414 f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MINHOTO, Manuel Joaquim da Costa. **Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis.** 2005, 329 f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia, Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal, 2005.

MOMM, Leto. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. 1998. 289 f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

MORILHA, Jr. A. e Greca, M.R., 2003. **Betume borracha ecoflex. Greca Asfaltos**. Curitiba, Paraná, Brasil.

MOTTA, Laura Maria Goretti da. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade de ensaio de cargas repetidas.** 1991. 386 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOURA, Edson de. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** 2010. 299 f. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

NASCIMENTO, Filipi. A. C; GUIMARÃES, Antonio Carlos R.; CARNEIRO, Luis Antonio V. **Análise da influência das propriedades do ligante asfáltico e do esqueleto pétreo na deformação permanente de misturas asfálticas.** 44ª Reunião Anual de Pavimentação, Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv). Foz do Iguaçu. PR. Brasil.

NCHRP - National Cooperative Highway Research Program: **NCHRP-108: Guide for pavement friction**. Transportation Research Board of the National Academies, 2009. 257p.

PATERSON, W. D.O. **Road Deterioration and maintenace effects – models for planning and management.** 1987. 454 f. World Bank, The Jonhs Hopkins University Press Baltimore. Maryland, 1987.

PINHEIRO, Jorge Henrique Magalhães. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias**. 2004. 165 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

PINTO, Salomão. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos.** 1991. 489 f. Tese (Doutorado). COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.

SANTA CATARINA. EPAGRI. **Atlas climatológico.** 2016. Disponível em: <http://ciram.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com content&view=article&id=708&Itemid=484.>. Acesso em: 29 jul. 2016.

TANG Zhenzhong. Polissage et adhérence des chaussées routières. 2007, 276 f. Tese (Doutorado). École Nationale des Ponts et Chaussées, Nantes, 2007.

TRICHÊS, Glicério. **Desenvolvimento de método para dimensionamento de pavimentos asfálticos. Fase I: trechos experimentais e materiais de pavimentação**: UFSC: Informações do segmento de Araranguá/SC. Florianópolis, 2014.

TRICHÊS, Glicério; SANTOS, Antônio dos. **Avaliação do desempenho da reciclagem do pavimento da rodovia SC-301**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RODOVIAS E CONCESSÕES, 7., 2011, Foz do Iguaçu.

VALE, Cecília; MELO, Arnaldo Souza. **Análise do comportamento de pavimentos rodoviários flexíveis: Os modelos materiais das misturas betuminosas.** In: JORNADAS LUSO BRASILEIRAS DE PAVIMENTOS: POLÍTICAS E TECNOLOGIAS, V., 2006, Recife.

WARGHA FILHO, Nelson. **Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** 2013. 133 p**.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

WIKIPÉDIA. A enciclopédia livre. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ararangu%C3%A1>. Acesso em: 08/08/2016.

APÊNDICE A: Controle da temperatura da mistura asfáltica

Quadro 1: Temperatura da mistura aplicada no segmento 01

km inicial	km final	Pista (°C)	Aplicação (°C)	Compactação (°C)	Local
1ª camada					
0+320,00	0+390,00	150	145	140	Faixa esquerda
0+390,00	0+444,00	151	145	140	Faixa esquerda
0+444,00	0+500,00	150	144	140	Faixa esquerda
0+500,00	0+555,00	152	146	139	Faixa esquerda
0+555,00	0+600,00	150	145	140	Faixa esquerda
0+600,00	0+652,00	150	145	140	Faixa esquerda
0+301,00	0+355,00	155	150	144	Faixa direita
0+355,00	0+400,00	150	145	140	Faixa direita
0+400,00	0+470,00	151	145	139	Faixa direita
0+470,00	0+510,00	150	145	140	Faixa direita
0+510,00	0+580,00	150	146	141	Faixa direita
0+580,00	0+530,00	151	145	140	Faixa direita
0+630,00	0+651,00	147	141	135	Faixa direita
2ª camada					
0+350,00	0+395,00	151	145	140	Faixa esquerda
0+395,00	0+460,00	151	145	139	Faixa esquerda
0+460,00	0+480,00	150	144	138	Faixa esquerda
0+479,00	0+537,00	150	145	140	Faixa esquerda
0+537,00	0+590,00	150	145	141	Faixa esquerda
0+590,00	0+640,00	151	144	140	Faixa esquerda
0+640,00	0+658,00	150	145	140	Faixa esquerda
0+307,00	0+366,00	152	145	140	Faixa direita
0+366,00	0+405,00	151	144	140	Faixa direita
0+405,00	0+450,00	152	146	141	Faixa direita
0+450,00	0+500,00	153	147	142	Faixa direita
0+500,00	0+550,00	152	145	140	Faixa direita
0+550,00	0+600,00	151	145	140	Faixa direita
0+600,00	0+652,00	152	146	141	Faixa direita
0+652,00	0+658,00	148	143	137	Faixa direita
3ª camada					
0+310,00	0+360,00	154	152	152	Faixa esquerda
0+360,00	0+400,00	158	156	154	Faixa esquerda
0+400,00	0+440,00	156	154	152	Faixa esquerda
0+440,00	0+470,00	158	156	154	Faixa esquerda
0+470,00	0+540,00	156	154	152	Faixa esquerda
0+540,00	0+580,00	156	156	152	Faixa esquerda
0+580,00	0+620,00	158	158	154	Faixa esquerda
0+620,00	0+665,00	156	156	152	Faixa esquerda
0+300,00	0+340,00	156	156	154	Faixa direita
0+340,00	0+400,00	158	158	156	Faixa direita
0+400,00	0+460,00	156	156	156	Faixa direita
0+460,00	0+520,00	156	156	154	Faixa direita
0+520,00	0+580,00	154	154	152	Faixa direita
0+580,00	0+630,00	154	154	152	Faixa direita
0+630,00	0+660,00	154	150	150	Faixa direita

Quadro 2: Temperatura da mistura aplicada no segmento 02

km final	km inicial	Usina (°C)	Pista (°C)	Aplicação (°C)	Compactação (°C)	Local
1ª camada						
0+651	0+691	160	150	144	140	Faixa esquerda
0+704	0+742	159	158	150	-	Faixa esquerda
0+742	0+762	159	154	145	-	Faixa esquerda
0+762	0+800	160	156	148	-	Faixa esquerda
0+800	0+846	159	154	146	-	Faixa esquerda
0+846	0+890	157	155	147	-	Faixa esquerda
0+890	0+934	158	156	148	-	Faixa esquerda
0+934	0+982	160	154	146	-	Faixa esquerda
0+651	0+694	162	150	143	135	Faixa direita
0+703	0+737	161	154	146	-	Faixa direita
0+737	0+783	161	155	146	-	Faixa direita
0+783	0+826	159	158	148	-	Faixa direita
0+826	0+870	160	156	148	-	Faixa direita
0+870	0+915	159	158	150	-	Faixa direita
0+915	0+955	157	154	145	-	Faixa direita
0+955	0+987	162	157	146	-	Faixa direita
2ª camada						
0+657,00	0+700,00	-	155	150	145	Faixa esquerda
0+700,00	0+740,00	-	155	151	145	Faixa esquerda
0+740,00	0+792,00	160	154	150	144	Faixa esquerda
0+792,00	0+825,00	160	155	150	145	Faixa esquerda
0+825,00	0+872,00	160	154	151	144	Faixa esquerda
0+872,00	0+920,00	156	154	150	145	Faixa esquerda
0+920,00	0+960,00	158	-	-	-	Faixa esquerda
0+960,00	0+980,00	159	-	-	-	Faixa esquerda
0+657,00	0+685,00	158	155	151	144	Faixa direita
0+685,00	0+732,00	159	154	150	145	Faixa direita
0+732,00	0+785,00	158	155	150	145	Faixa direita
0+785,00	0+830,00	158	154	149	144	Faixa direita
0+830,00	0+870,00	158	152	147	142	Faixa direita
0+870,00	0+915,00	159	150	146	140	Faixa direita
0+915,00	0+960,00	158	151	145	140	Faixa direita
0+960,00	0+981,00	159	146	141	135	Faixa direita
3ª camada						
0+664	0+680	160	145	135	130	Faixa esquerda
0+680	0+718	158	151	145	140	Faixa esquerda
0+718	0+750	160	150	144	138	Faixa esquerda
0+750	0+780	159	150	145	140	Faixa esquerda
0+780	0+812	165	148	142	136	Faixa esquerda
0+812	0+850	158	148	142	136	Faixa esquerda
0+850	0+885	159	148	140	135	Faixa esquerda
0+885	0+920	158	147	140	135	Faixa esquerda
0+920	0+950	161	-	145	140	Faixa esquerda
0+950	0+977	160	150	145	140	Faixa esquerda
0+662	0+690	160	158	154	148	Faixa direita
0+690	0+740	161	160	156	150	Faixa direita
0+740	0+780	160	160	156	150	Faixa direita
0+780	0+850	161	158	154	150	Faixa direita
0+850	0+880	161	158	154	148	Faixa direita
0+880	0+930	161	156	150	148	Faixa direita
0+930	0+976	162	162	158	158	Faixa direita

Quadro 3: Temperatura da mistura aplicada no segmento 03

km final	km inicial	Usina (°C)	Pista (°C)	Aplicação (°C)	Compactação (°C)	Local
1ª camada						
0+690	0+725	177	168	158	150	Faixa esquerda
0+725	0+785	182	175	170	165	Faixa esquerda
0+765	0+800	182	170	165	162	Faixa esquerda
0+800	0+845	182	175	172	165	Faixa esquerda
0+845	0+890	182	175	173	170	Faixa esquerda
0+850	0+890	180	170	168	165	Faixa esquerda
0+890	0+940	182	175	173	170	Faixa esquerda
0+940	0+978	180	171	166	163	Faixa esquerda
0+978	0+984	182	170	165	160	Faixa esquerda
0+680	0+720	180	170	168	160	Faixa direita
0+720	0+750	174	174	167	163	Faixa direita
0+750	0+785	175	173	168	162	Faixa direita
0+785	0+810	174	173	168	162	Faixa direita
0+820	0+845	175	172	169	162	Faixa direita
0+845	0+872	173	173	167	163	Faixa direita
0+872	0+910	174	172	168	162	Faixa direita
0+910	0+942	174	172	165	163	Faixa direita
0+942	0+970	174	170	163	160	Faixa direita
0+970	0+985	173	170	165	161	Faixa direita
2ª camada						
0+647	0+690	161	151	146	142	Faixa esquerda
0+690	0+740	163	152	146	143	Faixa esquerda
0+740	0+780	163	150	144	142	Faixa esquerda
0+780	0+835	162	151	145	142	Faixa esquerda
0+835	0+880	161	152	146	143	Faixa esquerda
0+880	0+940	162	153	146	145	Faixa esquerda
0+940	0+981	161	151	145	143	Faixa esquerda
0+653	0+685	161	150	147	142	Faixa direita
0+685	0+722	162	151	-	143	Faixa direita
0+722	0+768	161	158	147	142	Faixa direita
0+768	0+805	162	152	145	142	Faixa direita
0+805	0+850	160	151	146	141	Faixa direita
0+850	0+895	161	150	147	143	Faixa direita
3ª camada						
0+650	0+700	161	161	152	150	Faixa esquerda
0+700	0+760	162	160	154	149	Faixa esquerda
0+760	0+803	163	159	154	148	Faixa esquerda
0+803	0+860	162	160	155	149	Faixa esquerda
0+860	0+904	162	160	155	150	Faixa esquerda
0+904	0+945	162	161	158	150	Faixa esquerda
0+945	0+979	163	160	154	149	Faixa esquerda
0+645	0+681	162	160	155	150	Faixa direita
0+681	0+722	161	160	155	150	Faixa direita
0+722	0+764	161	159	154	148	Faixa direita
0+764	0+805	163	158	154	148	Faixa direita
0+805	0+840	160	160	155	150	Faixa direita
0+840	0+880	161	160	156	151	Faixa direita
0+880	0+924	163	159	155	150	Faixa direita
0+924	0+960	164	160	154	150	Faixa direita
0+960	0+980	163	160	155	150	Faixa direita

Quadro 4: Temperatura da mistura aplicada no segmento 04

km final	km inicial	Pista (°C)	Aplicação (°C)	Compactação (°C)	Local
1ª camada					
0+303,00	0+366,00	149	143	138	Faixa esquerda
0+366,00	0+430,00	150	143	139	Faixa esquerda
0+430,00	0+495,00	150	144	141	Faixa esquerda
0+495,00	0+550,00	150	144	140	Faixa esquerda
0+550,00	0+600,00	151	145	139	Faixa esquerda
0+600,00	0+650,00	150	144	139	Faixa esquerda
0+302,00	0+342,00	-	-	-	Faixa direita
0+342,00	0+400,00	-	-	-	Faixa direita
0+400,00	0+457,00	150	145	140	Faixa direita
0+457,00	0+505,00	149	145	138	Faixa direita
0+505,00	0+552,00	151	144	140	Faixa direita
0+552,00	0+600,00	150	146	141	Faixa direita
0+600,00	0+657,00	151	145	140	Faixa direita
2ª camada					
0+308,00	0+324,00	150	145	139	Faixa esquerda
0+324,00	0+370,00	150	145	140	Faixa esquerda
0+370,00	0+425,00	152	145	139	Faixa esquerda
0+425,00	0+480,00	151	144	139	Faixa esquerda
0+480,00	0+525,00	152	146	141	Faixa esquerda
0+525,00	0+577,00	152	146	142	Faixa esquerda
0+477,00	0+630,00	153	147	143	Faixa esquerda
0+630,00	0+648,00	150	145	140	Faixa esquerda
0+306,00	0+346,00	150	145	140	Faixa direita
0+346,00	0+395,00	150	145	139	Faixa direita
0+395,00	0+454,00	150	145	140	Faixa direita
0+454,00	0+510,00	153	144	140	Faixa direita
0+510,00	0+560,00	151	145	140	Faixa direita
0+560,00	0+620,00	-	-	-	Faixa direita
0+620,00	0+654,00	150	144	139	Faixa direita
3ª camada					
0+310,00	0+350,00	156	156	154	Faixa esquerda
0+350,00	0+400,00	158	156	156	Faixa esquerda
0+400,00	0+440,00	156	156	154	Faixa esquerda
0+440,00	0+480,00	158	156	156	Faixa esquerda
0+480,00	0+525,00	156	156	154	Faixa esquerda
0+525,00	0+560,00	154	154	152	Faixa esquerda
0+560,00	0+620,00	154	154	152	Faixa esquerda
0+620,00	0+640,00	156	152	152	Faixa esquerda
0+311,00	0+380,00	154	150	143	Faixa direita
0+380,00	0+427,00	154	149	144	Faixa direita
0+427,00	0+500,00	152	152	152	Faixa direita
0+500,00	0+560,00	154	154	152	Faixa direita
0+560,00	0+620,00	156	154	154	Faixa direita
0+620,00	0+640,00	154	152	152	Faixa direita

Quadro 5: Temperatura da mistura aplicada no segmento 05

km final	km inicial	Pista (°C)	Aplicação (°C)	Compactação (°C)	Local
1ª camada					
1+500,00	1+575,00	151	145	141	Faixa esquerda
1+575,00	1+640,00	151	146	141	Faixa esquerda
1+640,00	1+640,00	150	144	140	Faixa esquerda
1+690,00	1+739,00	150	144	140	Faixa esquerda
1+739,00	1+820,00	150	150	148	Faixa esquerda
1+820,00	1+840,00	150	148	148	Faixa esquerda
1+840,00	1+851,00	150	145	140	Faixa esquerda
1+535,00	1+590,00	150	145	140	Faixa direita
1+590,00	1+640,00	155	150	144	Faixa direita
1+640,00	1+690,00	154	149	145	Faixa direita
1+690,00	1+738,00	152	151	146	Faixa direita
1+738,00	1+760,00	150	150	148	Faixa direita
1+760,00	1+800,00	152	150	150	Faixa direita
1+800,00	1+840,00	150	150	148	Faixa direita
1+840,00	1+850,00	150	146	142	Faixa direita
2ª camada					
1+580,00	1+650,00	-	-	147	Faixa esquerda
1+650,00	1+710,00	156	150	145	Faixa esquerda
1+710,00	1+800,00	155	150	146	Faixa esquerda
1+800,00	1+890,00	154	149	145	Faixa esquerda
1+890,00	1+912,00	150	147	143	Faixa esquerda
1+555,00	1+610,00	150	145	142	Faixa direita
1+610,00	1+655,00	151	145	143	Faixa direita
1+655,00	1+700,00	152	148	143	Faixa direita
1+700,00	1+752,00	151	146	142	Faixa direita
1+752,00	1+810,00	152	148	144	Faixa direita
1+810,00	1+860,00	150	148	141	Faixa direita
3ª camada					
1+520,00	1+520,00	150	145	140	Faixa esquerda
1+582,00	1+582,00	155	150	144	Faixa esquerda
1+640,00	1+640,00	156	150	145	Faixa esquerda
1+700,00	1+700,00	155	150	144	Faixa esquerda
1+760,00	1+760,00	156	151	145	Faixa esquerda
1+810,00	1+810,00	158	153	146	Faixa esquerda
1+885,00	1+885,00	157	152	146	Faixa esquerda
1+545,00	1+600,00	157	152	146	Faixa direita
1+600,00	1+650,00	155	150	144	Faixa direita
1+650,00	1+692,00	156	151	146	Faixa direita
1+692,00	1+755,00	160	155	151	Faixa direita
1+755,00	1+805,00	160	155	150	Faixa direita
1+805,00	1+870,00	162	156	151	Faixa direita

ANEXO A: Dimensionamento do pavimento

Dimensionamento do Pavimento

Dados de entrada:

- *Subleito: tipo I, ISp = 11,0% = CBR*
- *Número "N"=1,13 x 10^8 (USACE)*
- *Espessura total de pavimento requerida:*

  $Ht = 77,67 \cdot (N)^{0,0482} \cdot (CBR)^{-0,598} = 45,2$ cm
- *Deflexão de projeto (Dp = 0,94.Da)*

  log Da = 3,148 – 0,188 log N

  Da = (43,27 x 10^{-2} mm);

Adotado Dp= 0,94.Da = 40,70 x 10^{-2} mm

- *Espessura mínima teórica da camada betuminosa*

  $Hcb = -5,737 + 807,961\ (Dp)^{-1} + 0,972 \cdot I1 + 4,101 \cdot I2$

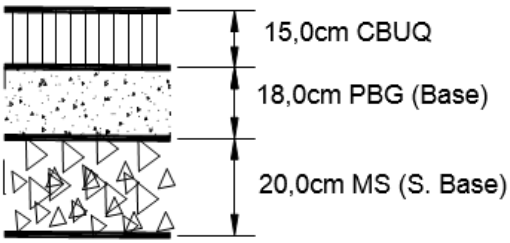
  I1 = I2 = 0 e Hcb = 14,11 cm; adotado Hcb = 15,0 cm.
- *Valor estrutural da camada betuminosa (VE)*

  Valor recomendado no método = 2,8; valor adotado = 2,0
- *Espessura da camada granular*

  Hcb x 2,0 + Hcg = Ht = 45,2

  Hcg > 15,20 cm

Adotado Hcg = 38,0 centímetros, composto por 18,0 cm de base de brita graduada sobre 20,00 centímetros de sub-base de macadame seco.



ANEXO B: Estudo do Tráfego - Rodovia BR 101 – Lote 29/SC

3.1. ESTUDOS DE TRÁFEGO

Os estudos de tráfego tiveram por objetivo básico, avaliar e caracterizar a demanda usuária, atual e futura, do subtrecho em projeto, o qual encontra aplicação como entrada em processos de dimensionamento de infraestrutura encarregada de atendê-la em condições estruturais, operacionais e funcionais satisfatórias.

Foi realizada coleta de dados disponíveis que pudessem formar um banco de dados conhecido que permitisse a identificação do comportamento do tráfego na região e auxílio na elaboração do Plano de Contagem.

Conforme estabelecido no item 4.3.1. do Edital, apresentou-se "O Plano de Contagem de Tráfego" para aprovação pelo DNER, em 22/06/98.

O plano apresentado, contemplou a proposição de diferentes modalidades de pesquisas em campo, para a correta mensuração do tráfego no segmento da rodovia, as quais embasaram a formulação do Plano Funcional apresentado.

A disponibilidade dos dados coletados facilitou em muito a formulação do plano, pois permitiu a determinação dos fatores de correção e de fatores de expansão.

O plano de Contagem de Tráfego proposto e aceito, contemplou a implementação das pesquisas de campo abaixo descritas, cujo croqui de localização dos postos de contagem é apresentado na sequência:

Contagem volumétrica classificatória direcional	02 Postos
Contagem volumétrica classificatória	02 Postos
Contagem de origem/destino de placas	12 Postos
Contagem classificatória em acessos	13 Postos
Contagem de pedestres e ciclistas longitudinalmente à pista	20 Postos
Contagem de pedestres e ciclistas transversalmente à pista	12 Postos
Contagem de afluxo de passageiros de ônibus	08 Postos
Contagem especial	01 Posto

- **Determinação do Tráfego Médio Diário Anual (TMDA)**

O tráfego Médio Diário Anual – TMDA para o ano de 1998 foi determinado a partir das pesquisas de campo realizadas.

Algumas contagens de 24 horas foram realizadas durante 03 dias de 24 horas diárias e outras, de apenas uma ou duas horas.

As contagens de 24 horas foram corrigidas através de dois fatores de correção do dia da semana. Esses fatores foram obtidos das contagens realizadas pelo DNER. Os fatores obtidos e utilizados foram:

- FCM - 1,247
- FCS - Quarta-feira – 0,918
- FCS - Quinta-feira – 0,870
- FCS - Sexta-feira – 1,135

Nas contagens de uma, ou duas horas foram utilizados três fatores de correção: FCM, FCS e FCH (fator de correção do horário da pesquisa). Os fatores de correção mensal e semanal foram os mesmos supra citados. Para o fator de correção horária cada posto teve seu próprio fator calculado de acordo com os postos DR1 e DR2.

Os dados de veículos foram transformados em TMDA, aplicando-se os fatores de correção acima mencionados.

As pesquisas realizadas, apontaram tráfego muito semelhante ao considerado pelo IME no Estudo de Pré-Viabilidade, razão pela qual, optou-se pela utilização do tráfego determinado no estudo.

O tráfego futuro foi determinado pela composição:

- Tráfego normal com crescimento natural
- Tráfego desviado em função das melhorias efetuadas, e
- Tráfego decorrente do aumento de intercâmbio com os países do Mercosul.

As pesquisas efetuadas determinaram apenas o tráfego normal. O tráfego desviado, principalmente da BR-116 e o tráfego do Mercosul, exigem outras pesquisas para a sua determinação. O estudo de Pré-Viabilidade realizado pelo IME teve o objetivo de prever esse incremento e foi considerado na definição do tráfego para o segmento em estudo.

Com base no tráfego do ano base, foi projetado o tráfego para o período de projeto de 10 anos (2003 – 2012), considerando-se uma taxa de crescimento anual de 3,8 %.

Calculando-se a projeção do TMDA para o período do projeto (10 anos) obtém-se:

ANO	TRECHO: ARARANGUÁ - ERMO				TRECHO: ERMO - SOMBRIO			
	CP	ON	CAM	TOTAL	CP	ON	CAM	TOTAL
2003	10257	578	6428	17263	9883	555	6169	16607
2004	10647	599	6672	17919	10259	576	6404	17239
2005	11052	622	6926	18600	10649	598	6647	17894
2006	11472	646	7189	19306	11053	621	6900	18574
2007	11908	670	7462	20040	11473	644	7162	19280
2008	12360	696	7746	20802	11909	669	7434	20012
2009	12830	722	8040	21592	12362	694	7717	20773
2010	13317	750	8346	22413	12832	720	8010	21562
2011	13823	778	8662	23263	13319	748	8313	22380
2012	14349	808	8992	24149	13825	776	8630	23231

PROJEÇÃO DE TRÁFEGO (TMDA)

- **Determinação do parâmetro "N"**

O número "N" – Equivalente de Operações do Eixo Padrão (8,2 toneladas) foi determinado através da seguinte expressão:

$$N = 365 \times TMDA \times \overline{FV} \times FR \times FD$$

Onde,

365 - número de dias de um ano.

TMDA – Tráfego Médio Diário Anual da Rodovia (ônibus e caminhões).

FV – Fator de Veículos ponderado.

FR – Fator Climático Regional (adotado = 1,0).

FD – Fator direcional (32% para CP e 45 % para veículos comerciais).

Os fatores de veículos considerados foram os seguintes:

- Fatores de Veículos Individuais (AASHTO)

VEÍCULO	PERCENTUAL %		FATOR DE VEÍCULO
	1	2	
Caminhão simples (2C)	13,1	14,0	0,12
Ônibus (2C)	8,2	8,3	0,28
Caminhão duplo (3C)	41,4	41,8	1,30
Reboque e semi-reboque (2S3, 3S3, 2S2, 3S2, 2C2, e 2S1)	37,3	35,9	2,85

ANEXO C: Resultados dos levantamentos feitos pela COPPE/UFRJ

Tabela 1: Resultados deflectométricos segmento 01. Fx. Direita

COPPE/UFRJ Ge ote cnia PAVIMENTOS	Levantamento Deflectométrico - FWD
Realização	COPPE/UFRJ - Laboratório de Geotecnia - Pavimentos
Contratante:	UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
Equipamento:	Falling Weight Deflectometer
Operadores:	Marcos Fritzen, Alvaro Dellê, Alan Fernandes e Max Gomes
Localização:	Araranguá
Sentido:	Araranguá-Sombrio
Trecho:	km 0+360 ao km 0+660 – SEGMENTO 01 – PISTA DIREITA – FAIXA DIREITA (T.R.E)
Faixa:	Direita
Condições Climáticas:	Sol com nuvens - Sem chuva

DADOS DO EQUIPAMENTO											
Diâmetro do Prato:	150 mm										
Sensor	0	1	2	3	4	5	6	7	8	-	
Posição	Centro	Atrás da Carga								-	
Distância (cm)	0	20	30	45	60	90	120	150	180	-	
Estaca/km	Carga (kgf)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	Temperatura
		(0,01mm)									Ar / Pav.
0+360	4014	24,8	20,4	17,6	13,4	10,4	6,6	4,2	3,2	2,6	22 / 30
0+380	4030	25,2	20,5	17,8	13,5	10,3	6,5	4,1	3,1	2,6	22 / 33
0+400	4019	26,7	21,0	17,6	12,9	9,7	5,9	3,7	2,9	2,4	22 / 33
0+420	4013	25,3	20,5	17,5	12,9	9,8	6,1	3,8	2,9	2,5	22 / 32
0+440	4003	27,0	22,0	19,2	14,5	11,4	7,1	4,3	3,5	2,7	22 / 33
0+460	4006	25,0	20,1	17,0	12,7	9,7	6,2	3,8	3,1	2,6	22 / 32
0+480	3990	25,4	20,8	18,2	13,5	10,7	6,7	4,3	3,3	2,6	23 / 33
0+500	4014	25,6	20,9	18,1	13,7	10,7	6,7	4,1	3,2	2,7	22 / 33
0+520	3975	30,1	24,6	21,2	15,9	12,5	7,8	4,9	3,8	3,1	22 / 33
0+540	4001	26,9	21,9	18,9	14,7	11,1	7,2	4,7	3,7	3,0	22 / 33
0+560	3984	25,9	21,3	18,4	14,2	10,9	7,0	4,5	3,6	3,0	22 / 33
0+580	4005	30,0	24,0	20,6	15,4	11,8	7,3	4,5	3,5	2,9	22 / 32
0+600	3994	26,6	22,0	18,8	14,3	11,1	6,8	4,2	3,4	2,7	22 / 33
0+620	3983	28,9	23,6	20,3	15,5	12,2	7,7	5,0	4,0	3,3	22 / 33
0+640	3998	26,8	21,8	19,1	14,9	11,7	7,6	5,0	4,0	3,3	22 / 33
0+660	4003	26,8	22,0	19,0	14,6	11,4	7,4	4,9	4,1	3,3	22 / 34

Tabela 2: Resultados deflectométricos segmento 02. Fx. Direita

COPPE/UFRJ Ge ote cnia PAVIMENTOS	**Levantamento Deflectométrico - FWD**
Realização	**COPPE/UFRJ - Laboratório de Geotecnia - Pavimentos**
Contratante:	UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
Equipamento:	Falling Weight Deflectometer
Operadores:	Marcos Fritzen, Alvaro Dellê, Alan Fernandes e Max Gomes
Localização:	Araranguá
Sentido:	Araranguá-Sombrio
Trecho:	km 0+660 ao km 0+960 – SEGMENTO 02 – PISTA DIREITA – FAIXA DIREITA (T.R.E)
Faixa:	Direita
Condições Climáticas:	Sol com nuvens - Sem chuva

DADOS DO EQUIPAMENTO											
Diâmetro do Prato:	150 mm										
Sensor	0	1	2	3	4	5	6	7	8	-	
Posição	Centro	Atrás da Carga								-	
Distância (cm)	0	20	30	45	60	90	120	150	180	-	

Estaca/km	Carga (kgf)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	Temperatura	
		(0,01mm)									Ar	Pav.
0+680	3982	22,8	19,1	16,9	13,3	10,4	7,0	4,5	3,7	3,1	23	34
0+700	3999	21,7	18,4	16,2	12,6	10,0	6,4	3,9	3,0	2,5	23	35
0+720	3988	20,7	17,1	15,2	11,5	9,2	5,8	3,6	2,6	2,4	23	36
0+740	4002	21,3	17,0	14,7	11,4	9,0	5,9	3,7	3,0	2,3	23	36
0+760	4015	22,6	18,5	16,0	12,7	10,2	6,6	4,3	3,1	2,8	23	36
0+780	3988	23,7	19,3	16,0	13,0	10,2	6,6	4,1	3,1	2,7	23	36
0+800	3973	24,0	19,9	16,9	13,2	10,4	6,6	4,0	3,1	2,6	24	36
0+820	3994	24,6	20,4	17,9	14,0	10,9	7,0	4,3	3,3	2,7	24	37
0+840	3982	23,0	19,1	16,8	13,0	10,5	6,9	4,4	3,4	2,8	24	37
0+860	3985	23,7	19,8	17,3	13,5	10,7	6,9	4,6	3,5	2,8	24	38
0+880	3973	26,2	21,8	18,9	14,2	11,2	7,3	4,7	3,9	3,3	24	38
0+900	3983	25,3	20,9	18,2	14,2	11,6	7,5	4,9	3,6	3,1	24	38
0+920	3977	23,3	19,2	16,9	13,2	10,6	7,1	4,6	3,5	3,2	24	37
0+940	3992	23,9	19,5	17,0	13,3	10,6	7,0	4,5	3,7	3,2	24	38
0+960	3999	23,9	19,7	17,1	13,1	10,7	6,7	4,3	3,6	2,9	23	37

Figura 1: Bacias deflectométricas dos segmentos 01 e 02. Fx. direita

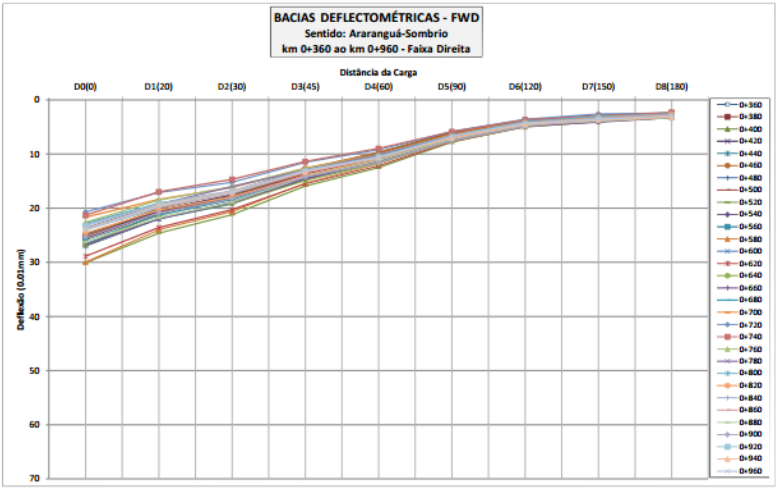


Figura 2: Deflexões máximas dos segmentos 01 e 02. Fx. direita

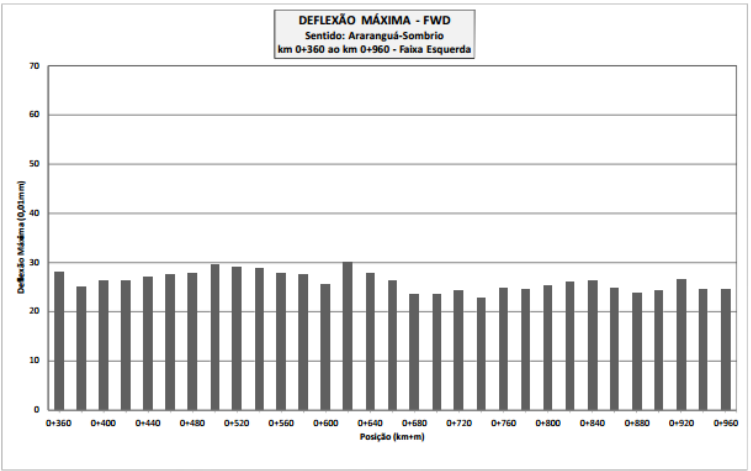


Tabela 3: Resultados deflectométricos do segmento 03. Fx. esquerda

COPPE/UFRJ Geotecnia PAVIMENTOS	**Levantamento Deflectométrico - FWD**
Realização	COPPE/UFRJ - Laboratório de Geotecnia - Pavimentos
Contratante:	UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
Equipamento:	Falling Weight Deflectometer
Operadores:	Marcos Fritzen, Alvaro Dellê, Alan Fernandes e Max Gomes
Localização:	Araranguá
Sentido:	Sombrio-Araranguá
Faixa:	Direita
Trecho:	km 0+960 ao km 0+660 – SEGMENTO 03 – PISTA ESQUERDA – FAIXA DIREITA (T.R.E)
Condições Climáticas:	Sol com nuvens - Sem chuva

DADOS DO EQUIPAMENTO											
Diâmetro do Prato:	150 mm										
Sensor	0	1	2	3	4	5	6	7	8	-	
Posição	Centro	Atrás da Carga								-	
Distância (cm)	0	20	30	45	60	90	120	150	180	-	

Estaca/km	Carga (kgf)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	Temperatura (°C)	
		(0,01mm)									Ar	Pav.
0+960	3984	24,4	20,1	17,3	13,0	10,3	6,6	3,8	3,3	2,5	23	35
0+940	3985	25,1	20,6	17,8	13,4	10,6	6,4	3,9	3,2	2,7	24	36
0+920	3996	25,2	21,1	18,5	14,3	11,4	7,0	4,2	3,4	2,6	23	36
0+900	3968	27,7	23,0	19,9	15,1	12,0	7,5	4,5	3,6	2,8	24	36
0+880	3977	27,4	22,9	20,3	15,8	12,5	7,9	4,7	3,6	3,0	24	35
0+860	3983	27,5	23,2	20,5	16,1	12,8	8,1	5,0	3,7	2,9	23	35
0+840	4002	26,1	22,3	19,9	15,8	12,9	8,3	5,1	3,9	3,0	24	35
0+820	3997	26,7	22,5	19,8	15,5	12,4	7,9	4,9	4,0	3,0	24	35
0+800	3986	26,9	22,0	19,2	14,6	11,6	7,3	4,3	3,4	2,6	24	36
0+780	3981	25,9	21,4	18,6	14,3	11,3	7,2	4,5	3,4	2,7	23	37
0+760	3967	26,0	21,1	18,2	13,7	10,8	6,5	4,0	3,3	2,5	23	37
0+740	3975	24,4	20,1	17,6	13,5	10,7	6,7	4,2	3,3	2,7	22	37
0+720	3985	23,6	19,1	16,7	12,4	10,2	6,0	4,1	3,1	2,5	23	36
0+700	3964	23,7	19,5	17,0	13,1	10,4	6,7	4,2	3,5	2,8	22	36
0+680	3986	24,6	20,2	17,8	13,9	10,9	7,2	4,5	3,8	3,0	22	35
0+660	3958	24,9	20,8	18,4	14,3	11,4	7,5	4,8	4,0	3,3	22	36

Figura 3: Bacias deflectométricas do segmento 03. Fx. Esquerda

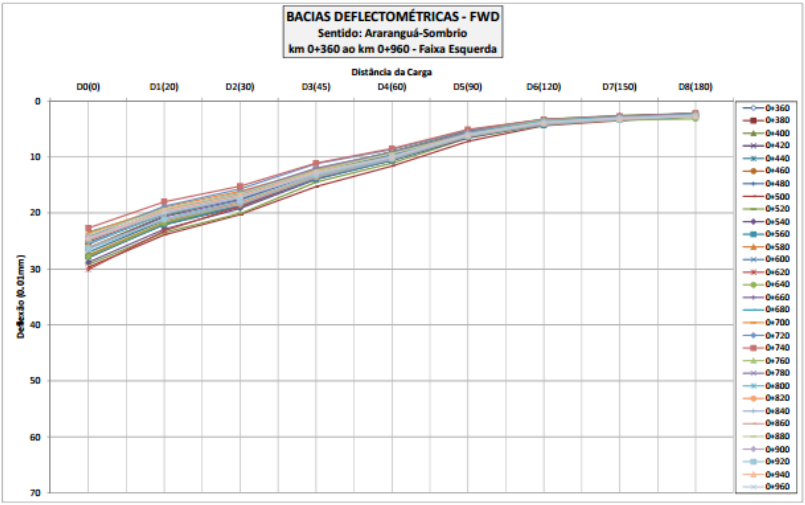


Figura 4: Deflexões máximas do segmento 03. Fx. Esquerda

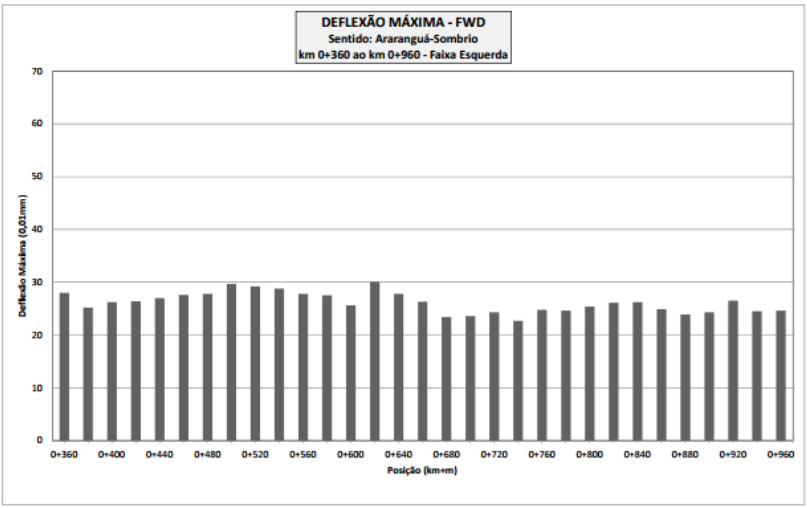


Tabela 4: Resultados deflectométricos segmento 03. Fx. direita

COPPE/UFRJ Geotecnia PAVIMENTOS	**Levantamento Deflectométrico - FWD**
Realização	COPPE/UFRJ - Laboratório de Geotecnia - Pavimentos
Contratante:	UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
Equipamento:	Falling Weight Deflectometer
Operadores:	Marcos Fritzen, Alvaro Dellê, Alan Fernandes e Max Gomes
Localização:	Araranguá
Sentido:	Sombrio-Araranguá
Faixa:	Esquerda
Trecho:	km 0+960 ao km 0+660 – SEGMENTO 03 – PISTA ESQUERDA – (T.R.I)
Condições Climáticas:	Sol com nuvens - Sem chuva

DADOS DO EQUIPAMENTO											
Diâmetro do Prato:	150 mm										
Sensor	0	1	2	3	4	5	6	7	8	-	
Posição	Centro	Atrás da Carga								-	
Distância (cm)	0	20	30	45	60	90	120	150	180	-	

Estacas	Carga (kgf)	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	Temperatura (°C)	
		(0,01mm)									Ar	Pav.
0+960	3958	22,8	18,5	15,8	12,0	9,3	5,9	3,7	3,0	2,4	21	36
0+940	3956	26,4	21,3	17,9	13,1	9,9	5,9	3,7	3,1	2,5	22	37
0+920	3968	26,2	21,0	17,8	13,0	10,0	6,0	3,9	3,0	2,6	22	38
0+900	3956	27,7	22,8	19,6	14,8	11,3	6,9	4,0	3,4	2,6	21	38
0+880	3953	28,0	22,4	19,2	14,5	11,2	6,8	4,1	3,3	2,8	22	37
0+860	3966	26,3	21,9	19,2	14,6	11,5	6,8	3,9	2,9	2,8	22	38
0+840	3935	28,0	22,8	19,9	15,1	11,6	7,1	4,3	3,2	2,7	22	37
0+820	3949	26,9	22,4	19,5	14,9	11,7	7,3	4,2	3,5	2,6	21	36
0+800	3958	27,6	22,3	18,8	14,2	10,8	6,6	3,8	3,2	2,8	21	37
0+780	3969	26,0	21,0	17,8	13,3	10,3	6,1	3,9	2,7	2,5	21	38
0+760	3963	24,9	19,7	16,5	12,3	9,3	5,5	3,3	2,7	2,2	21	38
0+740	3953	23,8	18,9	16,2	12,0	9,3	5,7	3,5	3,0	2,6	21	38
0+720	3955	22,5	17,9	15,2	11,3	8,8	5,5	3,3	2,9	2,4	21	37
0+700	3962	21,9	17,8	15,3	11,6	9,1	5,8	3,9	3,1	2,5	21	37
0+680	3949	24,1	19,2	16,7	12,6	9,8	6,2	4,0	3,1	2,7	21	35
0+660	3943	23,0	18,8	16,1	12,5	10,0	6,5	4,2	3,5	2,9	21	36

Figura 5: Bacias deflectométricas segmento 03. Fx direita

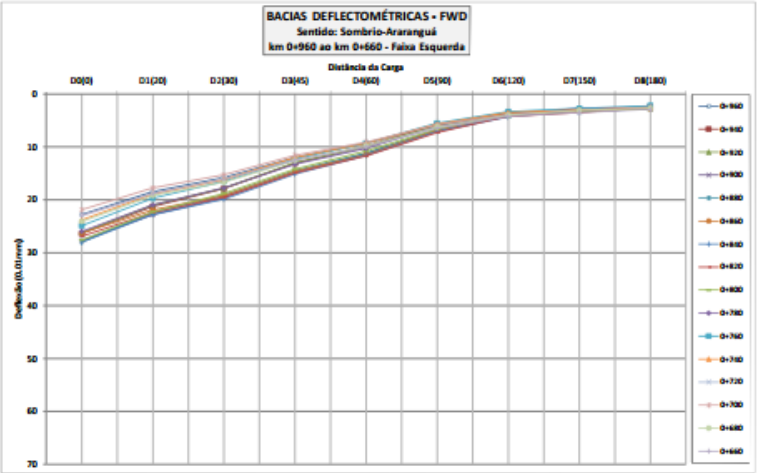


Figura 6: Deflexões Máximas segmento 03. Fx. direita

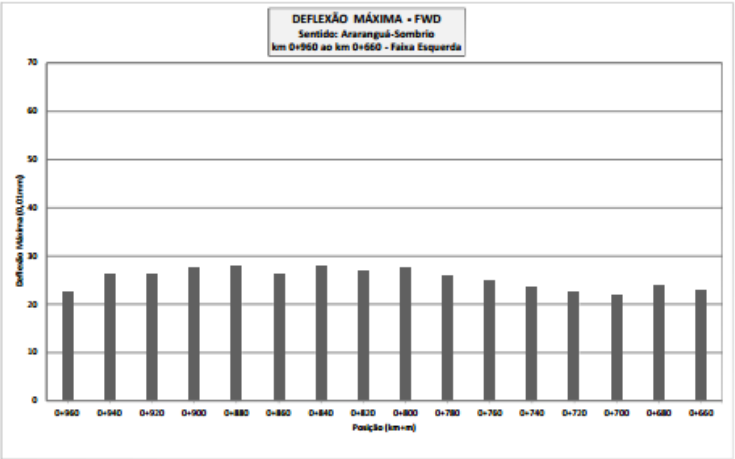
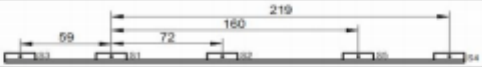


Tabela 5: Resultados do perfilômetro à *laser* dos segmentos 01 e 02. Fx. direita

COPPE/UFRJ Geotecnia PAVIMENTOS	**Levantamento com Perfilômetro**
Realização:	UFRJ/COPPE - Laboratório de Geotecnia - Pavimentos
Data:	
Contratante:	UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
Equipamento:	Perfilômetro CiberLaser
Operador:	Marcos Fritzen, Alvaro Delle, Alan Fernandes e Max Gomes
Localização:	BR-101
Sentido:	Araranguá-Sombrio
Faixa:	Direita
Trecho:	km 0+360 ao km 0+960
Distância entre Sensores (cm):	

ESTACA / km	ATR		IRI				QI				Velocidade (km/h)	Mancha de Areia
			SENSOR			Médio	SENSOR			Médio		
	Trilha Interna (mm)	Trilha Externa (mm)	1	2	5		1	2	5			
0+360	2,7	1,2	1,05	1,72	0,91	1,23	4,9	28,5	2,7	12,0	30	
0+380	1,0	1,6	0,87	0,65	1,83	1,11	1,5	1,0	22,5	8,3	32	0,91
0+400	0,4	1,1	1,58	2,06	3,83	2,49	10,8	11,5	36,8	19,7	32	
0+420	0,7	0,0	0,64	0,53	2,42	1,20	0,9	3,5	28,0	10,8	32	
0+440	1,1	0,9	0,94	0,65	1,38	0,99	2,7	0,2	5,0	2,6	32	0,94
0+460	2,2	1,2	1,14	0,98	1,20	1,11	9,8	4,3	5,8	6,6	32	
0+480	1,5	0,9	1,91	1,75	1,40	1,69	12,2	10,3	10,9	11,1	36	0,91
0+500	2,1	0,7	1,54	1,49	1,52	1,52	7,2	6,5	6,9	6,9	37	
0+520	2,5	0,4	1,98	2,15	1,35	1,82	18,5	18,0	10,6	15,7	35	
0+540	1,8	0,8	0,93	1,08	1,08	1,03	3,1	3,3	7,9	4,8	35	
0+560	1,5	0,7	0,64	0,84	0,95	0,81	0,6	2,2	2,6	1,8	34	0,79
0+580	2,3	1,0	2,76	2,60	2,25	2,54	29,1	20,8	23,7	24,5	35	
0+600	1,7	1,0	0,98	1,17	1,45	1,20	5,1	10,0	14,3	9,8	34	
0+620	1,5	0,9	2,25	1,92	2,43	2,20	22,9	14,3	16,3	17,8	34	
0+640	0,9	0,9	0,81	1,27	1,17	1,08	4,2	10,7	8,1	7,7	34	
0+660	1,7	1,3	3,19	2,54	3,80	3,18	32,3	31,1	41,8	35,1	34	
0+680	0,7	1,1	2,33	2,25	2,62	2,40	27,7	30,5	38,7	32,3	34	
0+700	0,9	2,0	1,45	1,66	1,49	1,53	9,7	5,3	2,2	5,7	34	
0+720	0,9	1,3	0,89	0,75	0,76	0,80	3,1	3,2	3,6	3,3	34	
0+740	1,4	1,6	1,46	2,43	1,62	1,84	10,6	32,3	14,1	19,0	34	
0+760	1,1	0,7	1,93	1,63	1,21	1,59	16,2	12,9	5,5	11,6	34	
0+780	1,1	0,9	2,33	1,89	1,60	1,94	28,5	17,5	10,5	18,8	33	
0+800	0,8	0,9	0,90	0,88	0,92	0,90	3,3	7,7	4,4	5,1	32	
0+820	1,0	0,8	2,58	2,43	1,50	2,17	24,1	17,8	5,1	15,7	32	
0+840	1,4	1,0	1,39	1,10	1,62	1,37	18,3	3,3	10,0	10,5	30	
0+860	1,3	0,8	1,94	0,88	1,14	1,25	23,2	3,5	2,0	9,6	30	
0+880	1,1	0,9	1,84	2,44	2,32	2,20	13,8	28,6	25,5	22,6	31	
0+900	1,0	0,9	2,37	2,36	1,06	1,93	24,3	16,2	6,9	15,8	32	
0+920	1,0	0,8	1,45	1,25	1,05	1,25	14,1	8,7	-0,5	7,4	33	
0+940	1,4	0,8	2,24	1,71	1,85	1,93	17,6	9,7	16,7	14,7	34	

Figura 7: Afundamento de trilha de roda dos segmentos 01 e 02. Fx. direita

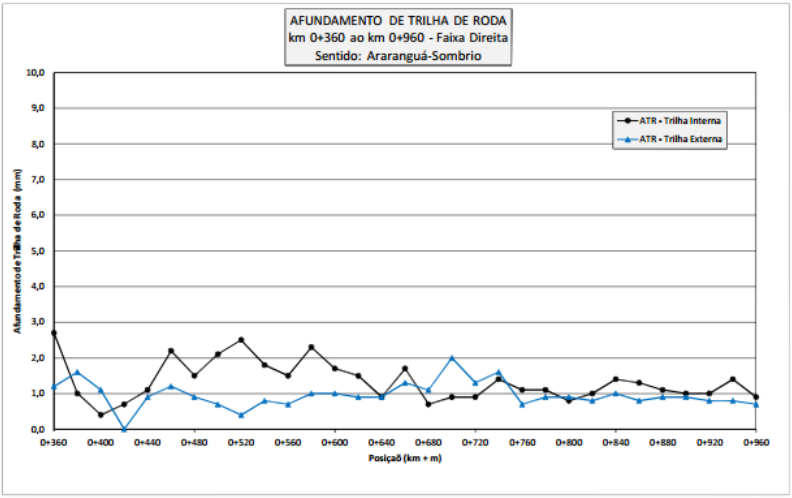


Figura 8: Resultados de irregularidades dos segmentos 01 e 02. Fx. direita

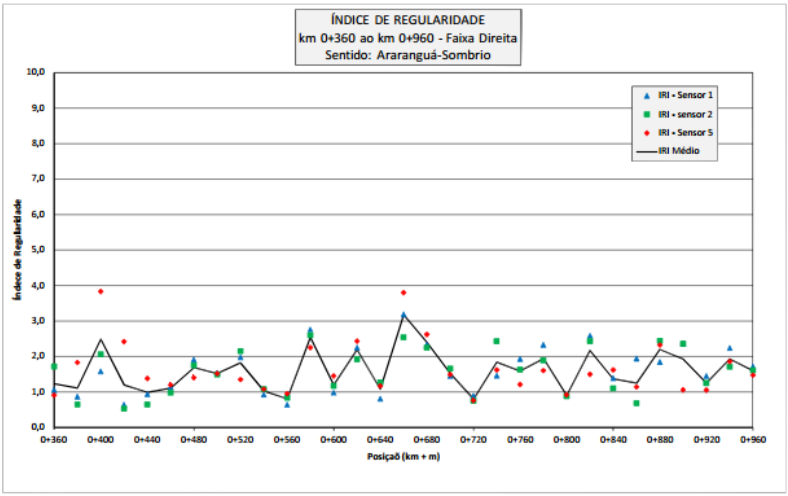
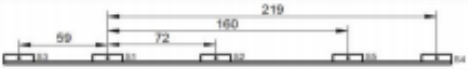


Tabela 6: Resultados do perfilômetro à *laser* dos segmentos 01 e 02. Fx. esquerda

COPPE/UFRJ Geotecnia PAVIMENTOS	**Levantamento com Perfilômetro**
Realização:	UFRJ/COPPE - Laboratório de Geotecnia - Pavimentos
Data:	
Contratante:	UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
Equipamento:	Perfilômetro CiberLaser
Operador:	Marcos Fritzen, Alvaro Delilé, Alan Fernandes e Max Gomes
Localização:	BR-101
Sentido:	Araranguá-Sombrio
Faixa:	Esquerda
Trecho:	km 0+360 ao km 0+960
Distância entre Sensores (cm):	

ESTACA / km	ATR		IRI				QI				Velocidade (km/h)	Mancha de Areia
			SENSOR			Médio	SENSOR			Médio		
	Trilha Interna (mm)	Trilha Externa (mm)	1	2	5		1	2	5			
0+360	0,9	0,4	1,45	1,74	2,03	1,74	13,2	14,8	18,6	15,5	.	
0+380	1,3	0,4	0,80	0,65	0,96	0,81	4,4	6,2	4,7	5,1	33	0,91
0+400	0,9	0,6	1,80	1,67	1,94	1,80	18,7	11,5	23,2	17,8	32	
0+420	0,8	0,9	1,02	1,16	1,14	1,11	2,9	3,8	0,8	2,5	32	
0+440	0,7	0,2	1,35	1,12	1,06	1,18	5,8	5,7	9,4	7,0	32	0,94
0+460	1,1	0,9	1,19	1,14	1,18	1,17	5,9	11,0	11,0	9,3	32	
0+480	1,1	1,7	1,99	1,70	1,24	1,64	19,4	18,5	11,2	16,4	32	0,91
0+500	0,9	1,3	1,05	1,01	1,19	1,08	4,3	8,4	13,0	8,5	32	
0+520	1,0	0,9	0,72	0,70	0,72	0,71	2,0	2,4	-0,9	1,2	31	
0+540	0,8	1,0	1,43	1,08	0,94	1,15	5,9	0,3	4,2	3,5	31	
0+560	0,8	0,8	0,67	0,83	1,22	0,90	-0,5	2,6	5,9	2,6	32	0,79
0+580	0,7	1,2	0,98	0,82	1,62	1,14	10,3	6,1	10,6	9,0	32	
0+600	0,9	1,0	1,29	0,87	0,79	0,98	10,0	6,3	2,8	6,4	32	
0+620	1,5	1,5	2,44	2,07	2,59	2,36	23,7	16,6	17,4	19,2	33	
0+640	1,5	1,8	1,31	1,13	1,35	1,26	3,3	4,6	8,1	5,4	33	
0+660	1,1	4,3	3,75	4,75	3,74	4,08	70,2	76,5	46,1	64,3	33	
0+680	1,0	1,0	1,79	1,30	1,38	1,49	14,3	9,8	8,9	11,0	32	
0+700	1,0	1,0	2,55	2,70	2,66	2,64	4,7	12,2	17,6	11,5	32	
0+720	1,1	0,7	1,56	1,71	1,99	1,76	5,9	7,2	5,0	6,0	32	
0+740	1,4	1,7	1,00	2,29	1,89	1,73	7,6	40,2	11,3	19,7	32	
0+760	1,0	1,6	0,94	0,81	0,89	0,88	1,3	0,7	0,9	1,0	31	
0+780	0,7	1,9	1,51	1,51	2,46	1,83	9,4	12,5	21,5	14,5	31	
0+800	0,8	2,0	1,35	1,91	2,55	1,94	9,1	8,0	15,0	10,0	31	
0+820	0,9	1,8	1,36	1,25	1,70	1,44	9,8	8,9	11,8	10,2	30	
0+840	0,6	1,1	1,31	1,16	1,33	1,27	6,9	2,1	11,4	6,8	31	
0+860	0,4	1,8	1,62	0,85	1,45	1,31	8,8	0,4	14,6	7,9	32	
0+880	0,7	1,5	1,60	1,59	1,73	1,64	5,5	5,5	10,7	7,2	32	
0+900	0,4	1,1	1,52	2,12	1,94	1,86	12,9	19,5	21,0	17,8	32	
0+920	0,8	1,4	1,98	2,60	1,49	2,02	16,3	26,5	17,4	20,1	32	
0+940	0,4	1,1	4,14	3,79	3,64	3,86	30,0	29,9	35,1	31,7	31	
0+960	0,2	3,0	1,49	2,36	3,21	2,35	12,3	19,2	44,7	25,4	31	

Figura 9: Resultados dos afundamentos de trilha de roda dos segmentos 01 e 02. Fx. esquerda

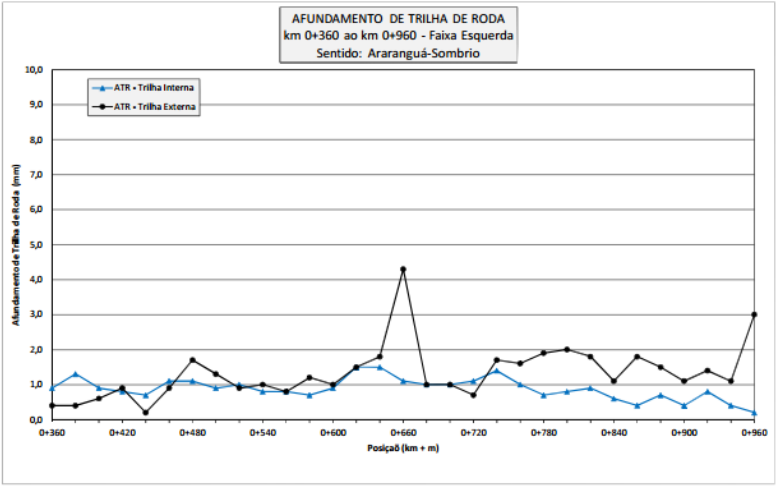


Figura 10: Resultados de irregularidade dos segmentos 01 e 02. Fx. esquerda

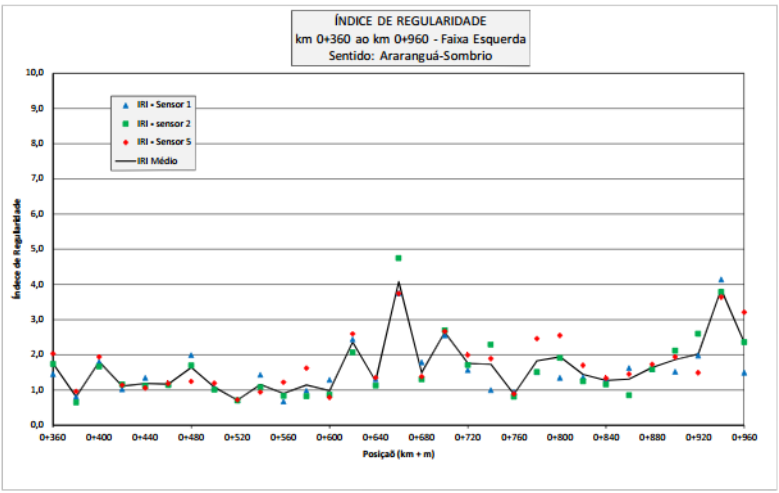
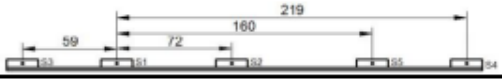


Tabela 7: Resultados do perfilômetro à *laser* do segmento 03. Fx. Direita

COPPE/UFRJ Geotecnia PAVIMENTOS	**Levantamento com Perfilômetro**
Realização:	UFRJ/COPPE - Laboratório de Geotecnia - Pavimentos
Data:	
Contratante:	UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
Equipamento:	Perfilômetro CiberLaser
Operador:	Marcos Fritzen, Alvaro Dellê, Alan Fernandes e Max Gomes
Localização:	BR-101
Sentido:	Sombrio-Araranguá
Faixa:	Esquerda
Trecho:	km 0+940 ao km 0+660
Distância entre Sensores (cm):	

ESTACA / km	ATR		IRI				QI				Velocidade (km/h)	Mancha de Areia
			SENSOR			Médio	SENSOR			Médio		
	Trilha Interna (mm)	Trilha Externa (mm)	1	2	5		1	2	5			
0+940	1,5	0,4	0,84	0,71	1,06	0,87	1,1	0,2	1,1	0,8	34	
0+920	1,5	0,7	1,77	1,65	2,35	1,92	13,4	11,2	19,1	14,6	34	
0+900	1,4	0,8	1,28	1,39	1,18	1,29	8,8	3,8	4,1	5,6	34	
0+880	1,6	1,2	1,78	2,00	2,43	2,07	18,7	17,6	27,9	21,4	34	
0+860	1,6	0,8	1,14	1,48	1,36	1,33	2,2	7,3	6,5	5,3	35	
0+840	1,4	0,9	1,58	2,27	1,56	1,80	5,7	26,9	9,3	14,0	35	
0+820	1,0	0,7	0,90	1,32	1,54	1,25	-1,3	2,5	4,9	2,1	35	
0+800	1,6	0,5	1,86	1,47	1,52	1,62	14,0	10,2	8,0	10,7	36	
0+780	1,6	0,6	1,41	1,53	0,88	1,27	6,5	7,8	-0,5	4,6	37	
0+760	1,3	0,4	2,75	2,52	2,92	2,73	20,6	22,1	23,5	22,0	35	
0+740	1,3	0,9	1,53	1,54	1,62	1,56	12,0	7,2	9,1	9,4	35	
0+720	1,9	0,9	1,78	1,78	1,97	1,84	10,9	15,9	18,8	15,2	35	
0+700	1,4	0,8	1,32	0,98	0,74	1,01	6,8	4,0	3,2	4,7	34	
0+680	1,7	0,9	2,48	2,82	2,68	2,66	15,8	16,4	17,1	16,4	33	
0+660	2,0	1,4	1,81	1,78	2,03	1,87	19,0	11,3	14,0	14,8	32	

Figura 11: Resultados dos afundamentos de trilha de roda do segmento 03. Fx. esquerda

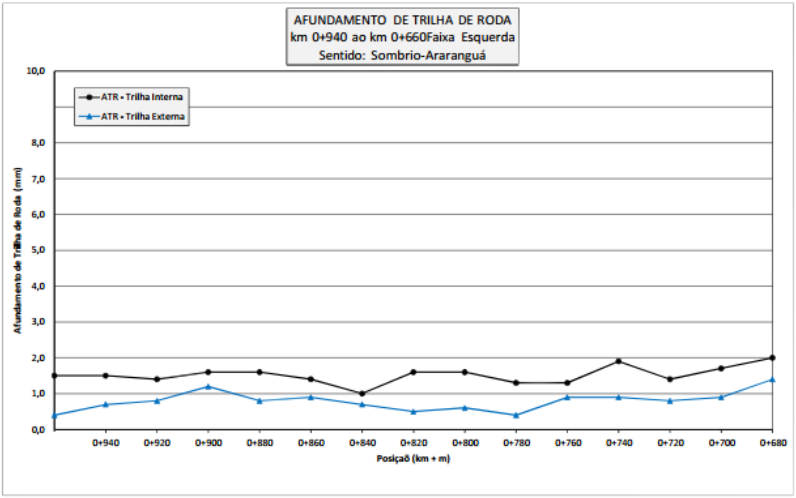


Figura 12: Resultados de irregularidade do segmento 03. Fx. esquerda

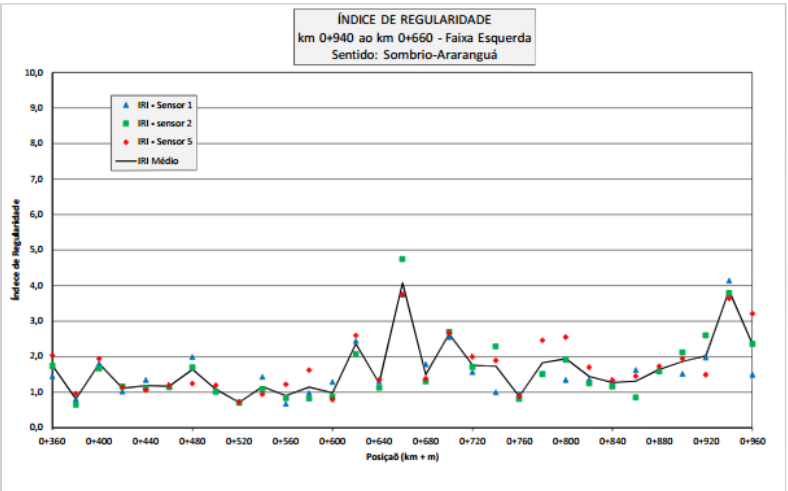


Tabela 8: Resultados de atrito dos segmentos 01 e 02

COPPE/UFRJ Geotecnia PAVIMENTOS	Grip Tester
Realização:	UFRJ/COPPE - Laboratório de Geotecnia - Pavimentos
Data:	
Contratante:	UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
Equipamento:	Grip Tester
Operador:	Marcos Fritzen, Alvaro Delié, Alan Fernandes e Max Gomes
Sentido:	Araranguá-Sombrio
Faixa:	Direita e Esquerda
Trecho:	km 0+360 ao km 0+960

Araranguá-Sombrio (Faixa da Direita)			
DISTÂNCIA (m)	km + m	GN	VELOCIDADE (km/h)
0	0+360	0,74	25
20	0+380	0,73	24
40	0+400	0,73	23
60	0+420	0,70	23
80	0+440	0,73	23
100	0+460	0,73	22
120	0+480	0,70	24
140	0+500	0,76	24
160	0+520	0,73	24
180	0+540	0,74	23
200	0+560	0,74	24
220	0+580	0,80	24
240	0+600	0,75	24
260	0+620	0,78	24
280	0+640	0,76	25
300	0+660	0,71	25
320	0+680	0,71	25
340	0+700	0,70	25
360	0+720	0,77	25
380	0+740	0,71	24
400	0+760	0,74	24
420	0+780	0,71	23
440	0+800	0,76	23
460	0+820	0,71	24
480	0+840	0,72	23
500	0+860	0,72	24
520	0+880	0,72	24
540	0+900	0,70	23
560	0+920	0,67	25
580	0+940	0,65	23
600	0+960	0,69	23

Araranguá-Sombrio (Faixa da Esquerda)			
DISTÂNCIA (m)	ESTACA	GN	VELOCIDADE (km/h)
0	0+360	0,77	24
20	0+380	0,78	24
40	0+400	0,71	27
60	0+420	0,74	28
80	0+440	0,78	26
100	0+460	0,74	24
120	0+480	0,77	23
140	0+500	0,71	23
160	0+520	0,71	24
180	0+540	0,76	24
200	0+560	0,72	24
220	0+580	0,71	24
240	0+600	0,73	23
260	0+620	0,73	23
280	0+640	0,73	23
300	0+660	0,75	24
320	0+680	0,79	24
340	0+700	0,75	24
360	0+720	0,71	24
380	0+740	0,77	24
400	0+760	0,75	23
420	0+780	0,72	24
440	0+800	0,73	23
460	0+820	0,73	23
480	0+840	0,71	23
500	0+860	0,74	24
520	0+880	0,77	23
540	0+900	0,77	23
560	0+920	0,73	24
580	0+940	0,63	23
600	0+960	0,69	23

Figura 13: Resultados de atrito dos segmentos 01 e 02. Fx. direita

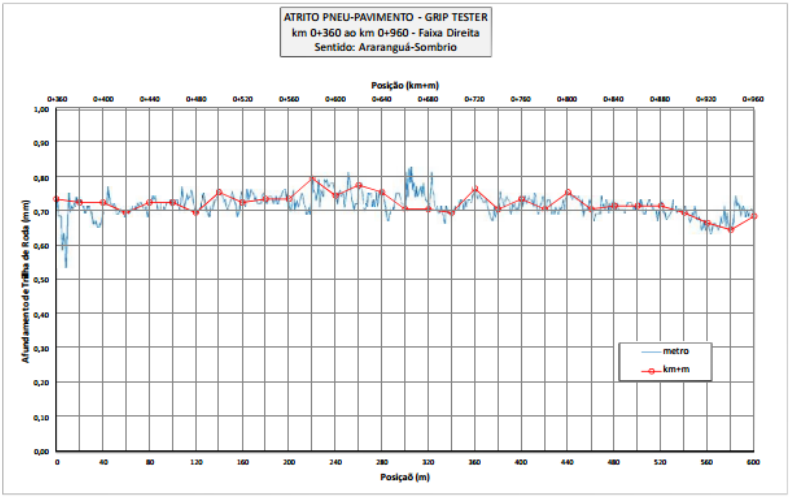


Figura 14: Resultados de atrito dos segmentos 01 e 02. Fx. esquerda

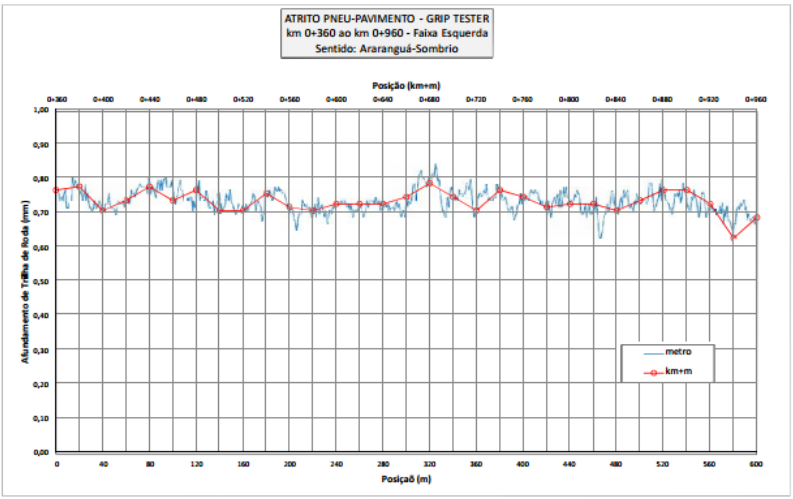


Tabela 9: Resultados de atrito do segmento 03

COPPE/UFRJ Geotecnia PAVIMENTOS	**Grip Tester**
Realização:	UFRJ/COPPE - Laboratório de Geotecnia - Pavimentos
Data:	
Contratants:	UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
Equipamento:	Grip Tester
Operador:	Marcos Fritzen, Alvaro Dellê, Alan Fernandes e Max Gomes
Sentido:	Sombrio-Araranguá
Faixa:	Direita e Esquerda
Trecho:	km 0+960 ao km 0+660

Sombrio-Araranguá (Faixa da Direita)				Sombrio-Araranguá (Faixa da Esquerda)			
DISTÂNCIA (m)	km + m	GN	VELOCIDADE (km/h)	DISTÂNCIA (m)	ESTACA	GN	VELOCIDADE (km/h)
0	0+960	0,59	24	0	0+960	0,60	26
20	0+940	0,65	25	20	0+940	0,69	26
40	0+920	0,67	25	40	0+920	0,69	24
60	0+900	0,63	24	60	0+900	0,69	24
80	0+880	0,59	24	80	0+880	0,70	25
100	0+860	0,61	24	100	0+860	0,70	25
120	0+840	0,63	24	120	0+840	0,70	24
140	0+820	0,65	24	140	0+820	0,67	23
160	0+800	0,65	24	160	0+800	0,74	25
180	0+780	0,68	24	180	0+780	0,77	25
200	0+760	0,69	24	200	0+760	0,74	25
220	0+740	0,71	24	220	0+740	0,72	25
240	0+720	0,74	24	240	0+720	0,70	25
260	0+700	0,70	24	260	0+700	0,71	25
280	0+680	0,71	24	280	0+680	0,71	24
300	0+660	0,73	24	300	0+660	0,73	23

Figura 15: Resultados de atrito do segmento 03. Fx direita

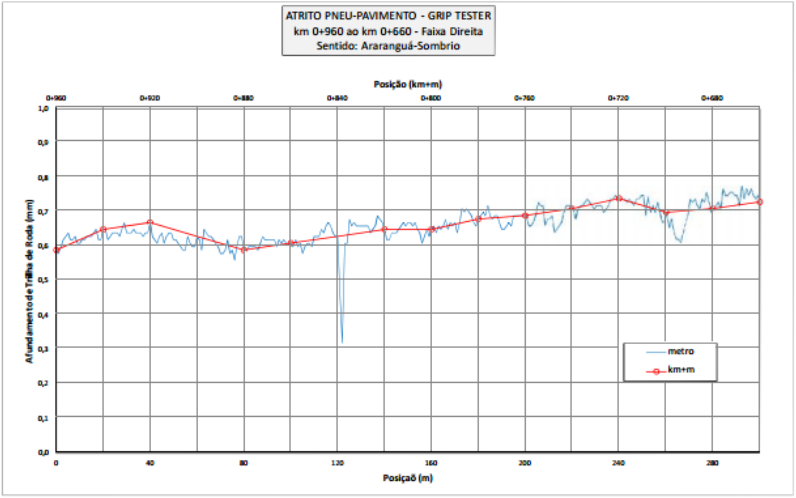


Figura 16: Resultados de atrito do segmento 03. Fx esquerda